UCAB Universidad Católica ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE FATIGA EN ESTRUCTURAS FIJAS COSTA AFUERA TIPO JACKET CAUSADA POR OLEAJE MARINO MEDIANTE EL PROGRAMA SACS VERSIÓN 5.3

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR Berra Kossik, Fernando E.

Sánchez Alfonzo, Vanessa C.

PROFESOR GUIA Ramírez L. Manuel J.

FECHA Caracas, Junio de 2.014

UCAB Universidad Católica ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DE FATIGA EN ESTRUCTURAS FIJAS COSTA AFUERA TIPO JACKET CAUSADA POR OLEAJE MARINO MEDIANTE EL PROGRAMA SACS VERSIÓN 5.3

Este Jurado; una vez realizada el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado:.....

J U R A D O E X A M I N A D O R

Firma: Nombre: PATRICIA PEREIRA

Firma: Nombre: MANUEL NOVEL

Firma: Nombre: JOSE A. NORIEGA H.

REALIZADO POR Berra Kossik, Fernando E.

Sánchez Alfonzo, Vanessa C.

PROFESOR GUIA Ramírez L. Manuel J.

FECHA Caracas, Junio de 2.014

DEDICATORIA

Le dedico este logro a mis padres porque gracias a sus sacrificios, educación y valores proporcionados he podido superar todos los obstáculos en mi vida y llegar hasta este punto, han sido y siempre serán mis modelos a seguir. A mi hermano por brindarme su apoyo siempre que lo he necesitado, ayudándome en más de una ocasión. A mis familiares y amigos que siempre estuvieron pendiente y me apoyaron a todo lo largo de mis estudios universitarios.

Berra K. Fernando E.

Primero que nada, agradezco a mis padres por ofrecerme la oportunidad de realizar mis estudios en esta Universidad, por proporcionarme la educación y valores a lo largo de mi vida. A mi hermano por ser mi ejemplo y modelo a seguir. A Adrián Da Costa por siempre estar conmigo brindándome su apoyo incondicional.

Sánchez A. Vanessa C.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro Tutor el Ingeniero Manuel Ramírez por guiarnos y proporcionarnos las herramientas necesarias para la realización de este trabajo.

A nuestro Coordinador Especial de Grado, Ingeniero Ricardo Rivas por contar con su apoyo.

A nuestros amigos y familiares por apoyarnos en estos años de constantes logros y dificultades.

Y por último, a Dios por guiar nuestros pasos y darnos la espiritualidad y sabiduría necesaria para llegar hasta este punto de nuestra carrera profesional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA I
AGRADECIMIENTOS II
ÍNDICE GENERAL III
ÍNDICE DE FIGURAS V
ÍNDICE DE TABLAS VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS VIII
ABREVIATURAS IX
SIMBOLOS IX
SINOPSIS XI
INTRODUCCION 1
CAPITULO I EL PROBLEMA 3
1.1 Planteamiento del problema 3
1.2 Antecedentes 5
1.3 Alcances y Limitaciones 6
1.4Objetivos 6
1.4.1 Objetivo General 6
1.4.2 Objetivos Específicos 6
CAPITULO II MARCO TEORICO 7
2.1 Ingeniería Costa Afuera 7
2.2 Estructura Costa Afuera 7
2.2.1 Estructuras Costa Afuera Fijas 7
2.3 Parámetros de Diseño de una Estructura Costa Afuera Fija Tipo Jacket 12
2.4 Factores Ambientales que Afectan a las Estructuras Fijas Costa Afuera 14
2.4.1 Oleaje Marino 15
2.5.1 Formulación de Fourier 19
2.5.2 Transformada Rápida de Fourier 21
2.6 Fatiga 22

2.6.1 Mecánica de la Fractura Enfocada a Predecir los Daños por Fatiga 25
2.6.2 Curva S-N Enfocada a Predecir los Daños por Fatiga 30
2.6.3 Regla de Daño Acumulativo por Fatiga 32
2.7 Método de Conteo de Ciclos 34
2.7.1 Conteo de Flujo de Lluvia (Rainflow Counting) 34
2.9 Análisis Espectral de la Fatiga Basados en Curvas S–N de Múltiples Segmentos 41
2.10 Factor de Concentración de Esfuerzos (SCF) 45
CAPITULO III MARCO METODOLOGICO 48
3.1 Tipo de Investigación 48
3.2.1 Recolección de datos para la elaboración de la investigación. 49
3.2.2 Consulta de Normas Internacionales 49
3.2.3 Modelaje de la estructura fija costa fuera tipo Jacket. 49
3.2.4 Dificultades durante el modelaje de la estructura fija costa afuera tipo Jacket 50
CAPÍTULO IV APLICACIÓN AL CASO REAL 51
4.1 Descripción del proyecto 51
4.2 Modelo Estructural 51
4.2.1 Modelado de la estructura en SACS versión 5.3 52
4.3 Análisis Espectral de Fatiga en SACS versión 5.3 65
CAPITULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 88
5.1 Resultados del Análisis Dinámico 88
5.2 Resultados del Análisis de Respuesta de Oleaje 90
5.3 Resultados del Análisis Espectral de Fatiga 93
5.4 Análisis de Resultados 94
5.4.1 Análisis Dinámico 94
5.4.2 Análisis de Respuesta de Oleaje 95
5.4.3 Análisis Espectral de Fatiga 96
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 97
6.1 Conclusiones 97
6.1.2 Relacionadas a la falla ocasionada por la fatiga 97

6.1.2 Relacionadas al Software SACS versión 5.3 98
6.1.3 Relacionadas al campo profesional 98
6.2 Recomendaciones 99
BIBLIOGRAFÍA 100
ANEXOS 102
ANEXO A 103
ANEXO B 110
ANEXO C 115

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: ZONAS DE EXPLOTACIÓN DE GAS COSTA AFUERA EN VENEZUELA 3
FIGURA 2.1: EJEMPLO DE ESTRUCTURA FIJA TIPO JACKET 8
FIGURA 2.2: EJEMPLOS DE PLATAFORMAS MÍNIMAS 9
FIGURA 2.3: EJEMPLO DE ESTRUCTURA DE GRAVEDAD 10
FIGURA 2.4: EJEMPLO DE TLP 12
FIGURA 2.5: PERFIL DE UNA OLA EN 2D 16
FIGURA 2.6: CLASIFICACIÓN DE LAS TEORÍAS DE OLEAJE SEGÚN AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. 17
FIGURA 2.7: TRES OLAS REGULARES SUMADAS EN UNA OLA IRREGULAR 19
FIGURA 2.8: AMPLITUD VS FRECUENCIA COMO RESULTADO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER 21
FIGURA 2.9: CRECIMIENTO DE LA GRIETA EN MATERIALES BAJO PROCESOS DE TENSIONES CÍCLICAS . 23
FIGURA 2.10: CONEXIÓN TUBULAR T DONDE SE DEFINE PUNTO DE VULNERABILIDAD DE INICIO DE LA GRIETA 24
FIGURA 2.11: FACTORES DE INTENSIDAD DE TENSIONES PARA GRIETAS DE DIFERENTES GEOMETRÍAS 26
FIGURA 2.12: MODELOS DE CURVAS S–N LINEAL Y DE MÚLTIPLES SEGMENTOS 31
FIGURA 2.13: A. GRUPOS DE ESFUERZOS B. CURVA S–N 33

FIGURA 2.14: EJEMPLO DE UN HISTORIAL DE ESFUERZOS EN EL TIEMPO Y SU MODELO EQUIVALENTE DE LÍNEAS RECTAS. 35

FIGURA 2.15: EJEMPLO DEL MÉTODO DE CONTEO DE FLUJO DE LLUVIA 36

FIGURA 2.16: A. VARIACIÓN DEL PARÁMETRO A CON RESPECTO A *E*, B. VARIACIÓN DEL PARÁMETRO B CON RESPECTO A *E*, C. VARIACIÓN DEL PARÁMETRO C CON RESPECTO A *E*. 40

FIGURA 4.1: CREACIÓN DE NUEVO ARCHIVO DE MODELAJE 53

FIGURA 4.2: OPCIONES DE MODELO 53

FIGURA 4.3: CUADRO DE DIALOGO PARA DEFINIR ELEVACIONES 54

FIGURA 4.4: CUADRO DE DIALOGO PARA DEFINIR LAS PIERNAS DE LA ESTRUCTURA 55

FIGURA 4.5: BOCETO PRELIMINAR DE LA ESTRUCTURA TIPO JACKET 55

FIGURA 4.6: VISTA EN PLATA COTA -79.5 57

FIGURA 4.7: VISTA EN PLANTA COTA -79.5 CON MIEMBROS HORIZONTALES 57

FIGURA 4.8: VISTA EN PLANTA COTA -79.5 CON ARRIOSTRAMIENTOS HORIZONTALES 58

FIGURA 4.9: VISTA ISOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA CON TODOS LOS ARRIOSTRAMIENTOS HORIZONTALES 58

FIGURA 4.10: VISTA LATERAL DE LA FILA A 59

FIGURA 4.11: VISTA LATERAL DE LA FILA A CON ARRIOSTRAMIENTOS EN FORMA DE X 59

FIGURA 4.12: VISTA ISOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA CON TODOS LOS ARRIOSTRAMIENTOS. 60

FIGURA 4.13: ASIGNACIÓN DEL SUELO DE LA CUBIERTA SECUNDARIA. 61

FIGURA 4.14: ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES AL GRUPO BR1 62

FIGURA 4.15: ASIGNACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL PISO DE LAS CUBIERTAS 63

FIGURA 4.16: VISTA ISOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA FINALIZADA. 63

FIGURA 4.17: OPCIONES DE GUARDADO DEL ARCHIVO 64

FIGURA 4.18: GUARDADO DEL ARCHIVO EN SACS 65

FIGURA 4.19: OPCIONES DE OLEAJE DEL ESTADO MARINO EN DIRECCIÓN 0°. 69

FIGURA 4.20: OPCIONES DE VIENTO DEL ESTADO MARINO EN DIRECCIÓN 0°. 69

FIGURA 4.21: OPCIONES DE CORRIENTE DEL ESTADO MARINO EN DIRECCIÓN 0°. 70

FIGURA 4.22: OPCIONES DE CRECIENTE MARINA 70

FIGURA 4.23: OPCIONES DE COEFICIENTE DE ARRASTRE E INERCIA. 71

FIGURA 4.24: SELECCIÓN DE GRADOS DE LIBERTAD DE LA ESTRUCTURA 72

FIGURA 4.25: OPCIONES GENERAL DE ANÁLISIS EN SACS 73

FIGURA 4.26: OPCIONES DEL ANÁLISIS DINÁMICO 74

FIGURA 4.27: CUADRO DE GENERADOR DE DATOS 75

FIGURA 4.28: OPCIONES PARA INSERTAR UNA LÍNEA NUEVA EN EL GENERADOR DE DATOS 76

FIGURA 4.29: OPCIONES DE CONDICIÓN DE CARGA 76

FIGURA 4.30: ASIGNACIÓN DE DATOS PARA GENERAR LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA 77

FIGURA 4.31: OPCIONES DE ANÁLISIS PARA HALLAR LA FUNCIÓN DE TRASFERENCIA 78

FIGURA 4.32: ASIGNACIÓN DE DATOS PARA GENERAR RESPUESTA DE OLAJE 80

FIGURA 4.33: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DEL OLEAJE 81

FIGURA 4.34: CREACIÓN DE NUEVO ARCHIVO DE DATOS 82

FIGURA 4.35: SELECCIÓN DE ARCHIVO DE FATIGA 82

FIGURA 4.36: DATOS DE OPCIONES DE FATIGA 83

FIGURA 4.37: DATOS DE OPCIONES DE FATIGA 2 83

FIGURA 4.38: OPCIONES PARA REMOVER GRUPO DEL ANÁLISIS 84

FIGURA 4.39: OPCIONES DE LÍMITES PARA SCF 84

FIGURA 4.40: OPCIONES DE CASO DE FATIGA 85

FIGURA 4.41: OPCIONES DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN 85

FIGURA 4.42: OPCIONES DE ALTURAS DE OLAS DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN 86

FIGURA 4.43: OPCIONES DE PERIODOS DE OLAS DEL DIAGRAMA DE DISPERSIÓN 86

FIGURA 4.44: OPCIONES DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE FATIGA 87

FIGURA 5.1: MODOS Y PERIODO NATURAL DE LA ESTRUCTURA 88

FIGURA 5.2: PRIMERA FORMA MODAL 89

FIGURA 5.3: SEGUNDA FORMA MODAL 89

FIGURA 5.4: UBICACIÓN DE LAS JUNTAS CON UNA VIDA DE SERVICIO MENOR A LA VIDA DE DISEÑO... 94

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1: SECUENCIA DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE FATIGA EN EL PROGRAMA SACS 66

TABLA 4.2: CONDICIONES AMBIENTALES NORMALES A LAS QUE ESTÁ EXPUESTA LA ESTRUCTURA 67

TABLA 4.3: SELECCIÓN DE OLAS PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE FATIGA 78

TABLA 5.1: MÁXIMOS VALORES DE LOS CORTANTES BASALES EN CADA DIRECCIÓN 93

TABLA 5.2: JUNTAS CON VIDA DE SERVICIO MENOR AL PERIODO DE VIDA DE DISEÑO 93

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRAFICO 5.1: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (FRECUENCIA VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 0° 90

GRAFICO 5.2: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (PERIODO VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 0° 90

GRAFICO 5.3: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (FRECUENCIA VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 45° 91

GRAFICO 5.4: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (PERIODO VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 45° 91

GRAFICO 5.5: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (FRECUENCIA VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 90° 92

GRAFICO 5.6: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (PERIODO VS CORTE BASAL) EN DIRECCIÓN 90° 92

ABREVIATURAS

- **API:** American Petroleum Institute
- **SACS:** Structural Analysis Computer System
- **SCF:** Stress Concentration Factor

SIMBOLOS

- **A_0:** Amplitud media de la
- **An y Bn:** Coeficientes de Fourier
- ***a*:** Tamaño de grieta
- **C_D:** Constante de arrastre
- **C_M:** Constante inercial
- c_d : Coeficientes de arrastre
- **c_m:** Coeficientes inercial
- ***D*:** Daño total por fatiga.
- **ΔK:** Factor de intensidad de tensiones
- **ΔK_{th} :** Factor de intensidad de tensiones del umbral
- **ΔS_h:** Rango de esfuerzos
- **E:** Módulo de elasticidad.
- **$F_{gs}(x)$:** Distribución tipo Gaussiana.
- **Fy:** Esfuerzo de fluencia.
- **$F_{ws}(x)$:** Distribución tipo Weibull.
- **G:** Módulo de rigidez trasversal.
- **H:** Altura de la ola
- **Hs:** Altura significativa de la ola
- **K_c:** Número de Keulegan–Carpenter
- ***P*:** Probabilidad del rango de esfuerzos.

- ρ_w: Densidad del agua
- R_e: Número de Reynolds
- S_h: Esfuerzo de amplitud constante
- **T:** Periodo
- T_z: Periodo medio de cruce por cero
- u: velocidad de la partícula de agua.
- $\dot{u}$: aceleración de la partícula de agua

SINOPSIS

ANÁLISIS DE FATIGA EN ESTRUCTURAS FIJAS COSTA AFUERA TIPO JACKET CAUSADA POR OLEAJE MARINO MEDIANTE EL PROGRAMA SACS VERSION 5.3

Este trabajo especial de grado tiene como finalidad dar a conocer una metodología para determinar los daños por fatiga en los miembros que componen a una plataforma fija costa afuera tipo jacket mediante el uso del software especializado en diseño y análisis para estructuras costa afuera SACS usando la versión 5.3, aplicado a un ejemplo de entrenamiento, obteniendo así el daño acumulado que causa el impacto repetitivo del oleaje marino sobre estas mismas.

La norma requerida para el avance de este trabajo especial de grado fue la norma americana API RECOMMENDED PRACTICE FOR PLANNING, DESIGNING AND CONSTRUCTING FIXED OFFSHORE PLATFORMS-WORKING STRESS DESING 2A-WSD (RP 2A-WSD), destinada al análisis, diseño y construcción de Plataformas Fijas tipo Jacket Costa Afuera.

Esta investigación proporcionará al lector una herramienta para el análisis de fatiga mediante el uso del programa SACS, esto se considera muy importante ya que se cuenta con poco conocimiento acerca de este software por ser poco conocido en Venezuela.

PALABRAS CLAVE: Ingeniería costa afuera, plataformas fija, falla por fatiga, oleaje marino, daño acumulado, cargas cíclicas, grieta

REALIZADO POR: Berra Kossik, Fernando Enrique

Sánchez Alfonzo, Vanessa Cristina

TUTOR: Ing. Ramírez L. Manuel J.

INTRODUCCION

Actualmente Venezuela se posiciona de primer lugar como el país con más reservas de petróleo en el mundo, con aproximadamente 297.000 millones de barriles, de acuerdo con un comunicado oficial emitido por el Ministro de Energías a mediados de enero del 2011, asimismo, se encuentra de octavo lugar en el mundo y primero en América Latina con las reservas más grandes de gas natural. A raíz de esto, ha venido en auge la inquietud de explotar tanto el gas natural como el petróleo en la zona del Mar Caribe. Para cumplir con este requerimiento, es necesario el uso de estructuras capaces de soportar tanto las condiciones ambientales a las que va a estar sometida como mantener la explotación y producción del hidrocarburo con el que se esté trabajando.

El ingeniero civil especializado en el área de costa afuera debe ser capaz de planear, diseñar, construir, transportar, instalar y mantener la infraestructura que sirve de base para obtener la producción de crudo o gas fuera de la costa de manera que dicha estructura funcione eficientemente, por esto, se ha decidido estudiar el efecto de desgaste sobre los miembros de la estructura causado por el olaje marino, el cual induce a que se produzcan fallas por fatiga, incluso llevando a la estructura a su colapso total.

A consecuencia de la ubicación de las plataformas, sus miembros se verán afectados directamente por el efecto de cargas cíclicas del olaje, las cuales estarán presente a lo largo de la vida útil de la estructura. El siguiente trabajo especial de grado se basó exclusivamente en el estudio de la falla por fatiga en los elementos que conforman la plataforma bajo efecto del oleaje marino durante un periodo de vida estimado, mediante un software especializado en el análisis y diseño de estructuras costa afuera llamado SACS.

Por todo lo expuesto anteriormente, es importante realizar un buen diseño de las plataformas marinas y conocer los principales mecanismos de falla de la misma a fin de evitar

consecuencias que puedan ocasionar la interrupción de la extracción y producción del crudo o gas natural.

En el capítulo uno se expone la problemática planteada, incluyendo a este, otros trabajos especiales de grados antecedentes, los objetivos principales y específicos del trabajo especial de grado.

El capítulo dos se basa en dar a conocer detalladamente los principales fundamentos teóricos necesarios para el estudio y análisis de las fallas por fatiga en estructuras costa afuera a partir del oleaje marino.

El capítulo tres describe el tipo de investigación que se realizó durante la elaboración de este trabajo especial de grado, incluyendo el método de obtención de datos y Normas utilizadas. Adicionalmente, nombran las dificultades presentadas durante la investigación.

El capítulo cuatro detalla el procedimiento llevado a cabo para la realización de un análisis de fatiga a través del programa SACS en la versión 5.3, a partir de datos obtenidos de un ejemplo para el entrenamiento del mismo software.

En el capítulo cinco se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir del análisis dinámico de la estructura, respuesta de oleaje y análisis espectral de fatiga de la plataforma fija costa afuera mediante el uso del programa SACS.

En el capítulo seis se describe las conclusiones y recomendaciones a las cuales se llegaron luego de la realización de la investigación especial de grado.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

En Venezuela los estudios de exploración costa afuera tuvieron sus inicios a finales de los años setenta y principios de los ochenta; éstos han sido realizados por Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) a través del Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo (INTEVEP). Información sobre los vientos, las corrientes, el oleaje y las mareas se han venido recolectado desde hace ya un largo periodo de tiempo y en distintas zonas de interés; datos importantes como éstos han acompañado proyectos para la explotación de gas y petróleo abarcando más de 500 mil kilómetros cuadrados a todo lo largo de la plataforma continental venezolana, consolidándose como el país que cuenta con las reservas de hidrocarburos más grande del mundo. En el siguiente mapa se muestran las zonas de interés para futuras explotaciones gasíferas en las costas Venezolanas.

Figura 1.1: Zonas de explotación de gas costa afuera en Venezuela
Fuente: La participación privada en el negocio gasífero aguas arriba en Venezuela Gonzalo Rodríguez

La figura anterior señala que nuestras costas están dividas en 8 zonas importantes para la exploración y explotación de gas, las cuales son las siguientes:

1. Golfo de Venezuela
2. North-East Falcón
3. Bonaire / Golfo Triste
4. Banquillas
5. Carúpano
6. North of Paria / Mariscal de Sucre
7. Esat-West Golfo de Paria
8. Deltana Platform

En este sentido se denota que el estado ha mantenido un gran interés en la construcción de estructuras costa afuera. Uno de los aspectos más importantes a destacar a la hora de su planificación y construcción, es conocer el efecto de las cargas ambientales a las que estarán sometidas; siendo el oleaje marino una de las causas más notables que pudiera producir desgaste en los miembros de la plataforma. Esta exposición y el alto costo que ellas representan, exigen que dichas estructuras estén bien diseñadas.

Sin embargo, se puede alegar que existe poco conocimiento acerca de los métodos y herramientas tecnológicas que ayudan a determinar y analizar la influencia que el oleaje marino puede tener sobre las estructuras costa afuera. Igualmente, se cuenta con pocos profesionales especializados en materia de cálculo y en el diseño de las mismas.

A la hora de realizar los cálculos para el diseño de estructuras en tierra firme, la situación está ganada porque se gozan de programas ampliamente conocidos en el mercado, que facilitan el estudio de factores como el sismo, el viento, etc. La problemática está planteada para aquellos que deben analizar, calcular y diseñar estructuras costa afuera, pues la falta de conocimiento de nuevas tecnologías en este sentido no ayuda, a pesar de que en Venezuela la planificación de este tipo de estructuras ha venido en aumento. Actualmente

existen programas eficientes que facilitaría el análisis de fatiga en estructuras fijas costa afuera, para determinar el efecto que el oleaje puede tener sobre los miembros de la estructura, pero estos software requieren de profesionales dispuestos al conocimiento y a la aplicación de estas tecnologías, a fin de optimizar los procesos de análisis cada vez más avanzados que requiere este tipo de estructuras.

1.2 Antecedentes

Como antecedentes a este trabajo especial de grado, se pueden mencionar otras dos fuentes realizado, una en la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB) y otro en la Universidad Nacional Experimental de las Fuerzas Armadas (UNEFA) descritos a continuación:

- **Efecto de cargas accidentales debido a la colisión de barcos en plataformas metálicas costa afuera** / Maurizio Jimenez, Carlos torres; Tutor José A. Noriega – 2013. Tesis de grado (Ing. Civil). – Universidad Católica Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, 2013. Cuyo objetivo principal es realizar el análisis de las normas y procedimientos para el cálculo de plataformas costa afuera fijas, construidas en acero, sometidas a cargas accidentales debido a la colisión de barcos.
- **Estudio de las acciones de los factores ambientales (oleaje, corriente y viento) asistido por el programa estructural SACS versión 5.3 en una estructura costa afuera** / Youging Hernández; Tutor Manuel Ramírez – 2011 Tesis de grado (Ing. Civil). – Universidad Nacional Experimental de las Fuerzas Armadas. Cuyo objetivo principal es Estudiar las acciones de los factores ambientales (oleaje corriente y viento) en una estructura fija Costa Afuera utilizando el programa estructural SACS Versión 5.3.

1.3 Alcances y Limitaciones

El presente trabajo especial de grado tiene como alcance el análisis exclusivo del fenómeno de fatiga causado por oleaje marino para las estructuras fijas costa afuera, excluyendo el efecto de otras cargas cíclicas o cargas ambientales, tampoco la interacción suelo estructura tomará parte en el análisis. Este estudio se llevará a cabo a través de un programa especializado de computadora llamado *Structural Analysis Computer System* (SACS) versión 5.3.

Como limitación para el desarrollo de este trabajo especial de grado se puede mencionar que es escaza la información sobre el uso del programa SACS, así mismo, la poca información que está disponible no está desarrollada a profundidad. Otro aspecto es que son pocos los profesionales en Venezuela que saben el correcto uso del programa.

1.4Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar el fenómeno de fatiga causado por el oleaje marino sobre los miembros de estructuras fijas costa afuera tipo jacket a través del programa SACS versión 5.3

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar las consecuencias de la fatiga sobre los miembros de las estructuras fijas costa afuera.
- Modelar una estructura fija tipo jacket mediante el del programa SACS aplicando cargas de oleaje establecidos bajo la norma API WSD a la estructura y estudiando el efecto de alto ciclaje sobre los miembros estructurales.
- Estudiar métodos para analizar y controlar la fatiga.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Ingeniería Costa Afuera

Según Chakrabarti (2005) la ingeniería costa afuera se dedica al análisis, diseño, construcción, operación y mantenimiento de instalaciones de estructuras marinas fueras de las costas, es decir en el mar. Esta estudia diversos factores que dependen del ambiente, cargas accidentales, condiciones tectónicas, entre otros, a los cuales las estructuras estarán sometidas a lo largo de su vida útil.

2.2 Estructura Costa Afuera

Una estructura costa afuera, considerada por este mismo autor, es aquella estructura fija o flotante que se encuentra retirada de las costas, es decir situada en el mar, y actualmente son utilizadas principalmente para la explotación de yacimientos de hidrocarburos que se encuentren en el lecho marino, aunque recientemente han surgido otras funciones para estas estructuras como granjas eólicas, aeropuertos, bases militares, etc. Para cualquiera que sea su función, los principios de diseño y construcción son los mismos.

2.2.1 Estructuras Costa Afuera Fijas

Una estructura fija costa afuera es una plataforma que se encuentran por encima del mar y el apoyo se extiende hasta el fondo del mar por medio de pilotes, cimentaciones artificiales u otro tipo de medio con el fin de que se comporte como un cuerpo rígido y poder soportar tanto el peso propio como las fuerzas ambientales del viento, las olas y las corrientes. Son construidos principalmente con miembros tubulares soldados. Existen distintos tipos de estructuras fijas y son las siguientes:

- Estructura tipo Jacket

Las estructuras tipo jacket son las más usadas para perforación y producción, y tienen normalmente entre 4 y 8 piernas que se extienden hasta el fondo del mar para lograr la estabilidad contra volcamientos. Son llamadas jacket ya que las pilas principales, las cuales son tubulares generalmente, se deslizan a través de las piernas de la estructura hasta anclarse en el fondo del mar. (Chakrabarti, 2005)

Por lo general estas plataformas soportan una superestructura que tiene entre 2 o 3 cubiertas con todos los equipos de perforación, producción y de reacondicionamiento. El uso de estas plataformas se ha limitado a profundidades entre 500 a 600 pies (150 – 180 metros) en el caso de mares con las condiciones más desfavorables, con olas de diseño típicas de 100 pies (30 metros).

Figura 2.1: Ejemplo de estructura fija tipo jacket
Fuente: Fatigue analysis of offshore fixed and floating structures Nelson Szilard Galgoul

- Plataformas Mínimas

Son estructuras pequeñas usadas en aguas poco profundas, hasta 61 metros de profundidad, ubicadas no muy lejos de la costa con pequeñas terrazas usadas para el desarrollo de campos marginales. Se requiere que estas estructuras tengan el menor peso posible.

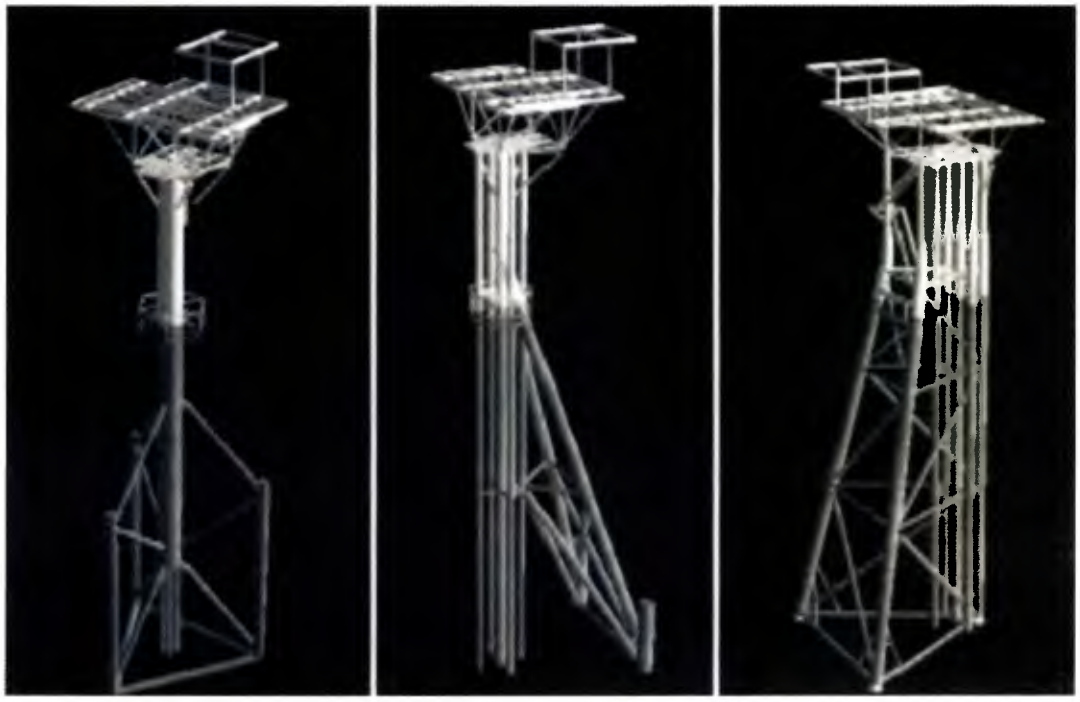


Figura 2.2: Ejemplos de plataformas mínimas
Fuente: Handbook of offshore engineering vol.1. Subrata K. Chakrabarti

- Estructuras de Gravedad

Estas son estructuras que se colocan en el fondo marino y se mantienen en su posición por el peso propio, no requieren el uso de anclajes ni pilas. Son construcciones que se realizan cerca de la costa y el principal material del que están hechos es el concreto, ya que requieren de gran volumen y peso.

Figura 2.3: Ejemplo de estructura de gravedad
Fuente: Handbook of offshore engineering vol.1. Subrata K. Chakrabarti

- Jack-ups

Son estructuras generalmente de 3 piernas con una cubierta en una de sus piernas. Son construidas principalmente con miembros tubulares de acero y la cubierta suele ser flotante. Son usadas para exploración de perforación y por lo tanto son diseñadas para poder ser trasladadas de un sitio a otro.

2.2.2 Estructuras Costa Afuera Flotantes

Una estructura flotante costa afuera es una plataforma que, contraria a la fija, se encuentra flotando en el mar y es sostenida por medio de guayas atadas desde la plataforma

hasta el fondo del mar. Son usadas principalmente en zonas de aguas muy profundas donde sea imposible el uso de una estructura fija. Al igual que las plataformas fijas, existen varios tipos de estructuras flotantes costa afuera y son las siguientes:

- Plataforma Semi-Sumergida

Estas plataformas flotantes poseen varias piernas que soportan un enorme cubierta. Las piernas están conectadas en la parte inferior a unos miembros horizontales flotantes llamados pontones, y a su vez estos miembros están sujetos con cables al lecho marino para evitar el desplazamiento. Esta configuración permite la reubicación de la unidad de perforación de pozo a otro, ya sea por sus propios medios o remolcando.

- Plataforma Spar

Es una estructura de gran profundidad, con un ducto flotante cilíndrico diseñado para soportar operaciones de perforación y producción. Son generalmente anclados al fondo del mar con múltiples líneas de amarre tensa.

- Tension Leg Platform (TLP)

Es una plataforma que se encuentra amarrada de manera vertical por cables altamente tensados. Esta estructura se opone a los movimientos verticales y a la rotación. Estas estructuras conservan las ventajas de operación de una estructura fija costa afuera, reduciendo el costo de producción en aguas de hasta 1500 metros de profundidad. Su producción y mantenimiento son similares al de las plataformas fijas, aunque son muy sensibles en cuento al peso que pueden soportar.

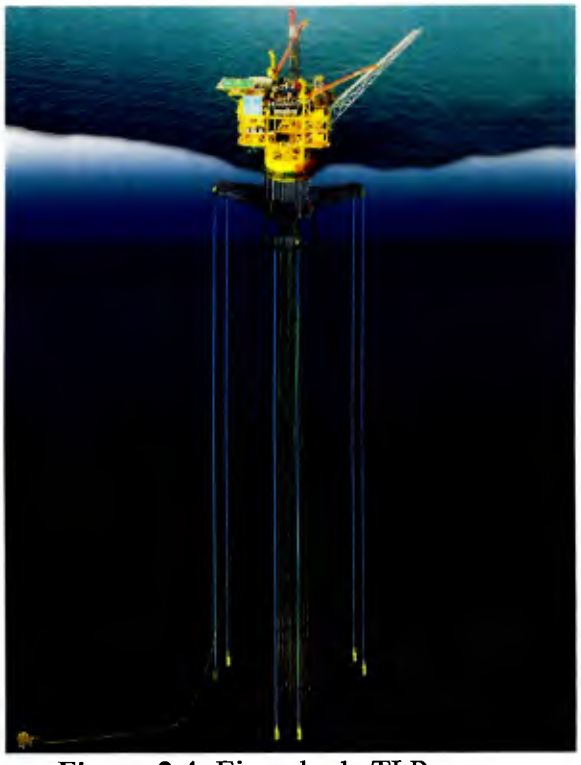


Figura 2.4: Ejemplo de TLP
Fuente: Fatigue analysis of offshore fixed and floating structures Nelson Szilard Galgoul

2.3 Parámetros de Diseño de una Estructura Costa Afuera Fija Tipo Jacket

Para el diseño de una estructura costa afuera fija tipo jacket existen diferentes normas y manuales, los cuales dan los diferentes parámetros y metodologías a tomar en cuenta. La norma más recomendada es la norma del American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A – WSD) cuyas última edición salió en el año 2007.

Existen tres elementos principales que conforman una estructura costa afuera fija tipo jacket y son los siguientes:

- Cubierta (Deck): Se encuentra por encima del mar y es donde se encuentran todo el equipo de perforación y producción, además de los sistemas de vida de la plataforma.

De acuerdo a los requisitos de operación e instalación y los equipos que se encontraran disponibles, las cubiertas pueden variar en tamaños, niveles y disposición. La cubierta se puede diseñar como una estructura de una sola pieza integrada o dentro del módulo de armadura de soporte. Si la cubierta es diseñada como una pieza integrada, debe ser instalada en sitio con grúas de elevación alta capacidad, si no, se realizara una instalación flotante.

- Torre o Jacket: es la estructura que proporciona soporte a la cubierta, así como a los conductores y a otras subestructuras como la zona de embarque, los topes de protección contra barcos, elevadores, sumideros, pasillos, etc. Los componentes principales de la estructura jacket son las siguientes:
    - Piernas del jacket.
    - Apoyos (verticales, horizontales y diagonales).
    - Juntas, que son los puntos de intersección entre las piernas y los apoyos.
    - Fundas y faldas para los pilotes (en caso de ser necesario).
    - Accesorios (zona de embarque, conductores de refuerzos, abrazaderas, etc.).
- Fundación: está conformada por los pilotes que se conducen a través de las piernas del jacket hasta el lecho marino. Los pilotes son generalmente soldados a las piernas del jacket por encima del nivel del mar.

Para el diseño de una plataforma fija costa afuera es muy importante conocer las cargas a las que va a estar sometida la estructura y sus principales efectos sobre la misma. Dependiendo de su función, ubicación y método de construcción, una plataforma costa afuera se ve afectada por varios tipos de cargas, las cuales son las siguientes:

- Cargas de la cubierta y los equipos: esto incluye el peso seco y húmedo de los equipos de la cubierta y sus instalaciones, el almacenamiento de material, equipos de operaciones, la flotabilidad y el peso propio de los elementos estructurales.

- Cargas ambientales: en estas las principales a tomar en cuenta son el viento, el oleaje, corrientes y efectos de las mareas, en el caso de que la plataforma se encuentre ubicada en regiones árticas, se debe tomar en cuenta las cargas de hielo por presencia de témpanos de hielo, formación de hielo y nieve, así como la temperatura a la que estará sometida la estructura. Los efectos de meteorología oceánica son muy variables y son los que en general controlan el diseño de la estructura jacket. Dentro de este grupo también se encuentran las cargas sísmicas, y los asentamientos y movimientos del fondo marino.
- Cargas de construcción: estos toman en cuenta todas las cargas a las que estará sometida la estructura durante su construcción, transporte e instalación, y son muy importantes ya que las cargas que se generan durante estos procesos son significativamente diferentes a las que experimenta la estructura una vez colocada en sitio.
- Cargas accidentales: estas cargas son las que se ocurren por un error humano, operativo, fallas de equipos o por la falta de precisión asociado con los métodos utilizados para predecir el funcionamiento. Dentro de estas se encuentran las cargas por impacto de buques, cargas por caídas de objetos (tuberías de perforación, equipos de producción, etc.) incendio y explosiones; también se incluyen los factores ambientales cuando tienen valores más altos que los esperados en el diseño.

2.4 Factores Ambientales que Afectan a las Estructuras Fijas Costa Afuera

Estos factores proporcionan datos de una serie de parámetros enunciados a continuación: vientos locales en la superficie, olas locales generadas por vientos o por tormentas lejanas, corrientes de superficie generadas por tormentas, corrientes energéticas de aguas profundas y corrientes no relacionadas con tormentas, como por ejemplo el circuito de corriente en el Golfo de México.

Las plataformas fijas costa afuera, que se colocan en el mar para la exploración y producción de recursos por debajo del fondo del océano, se encuentran a merced del medio ambiente y a estos factores los cuales las afectan durante toda su vida útil. Es por ello, que es muy importante por parte del diseñador conocer y tomar en cuenta para el diseño los efectos que estos factores pueden tener sobre la estructura.

A la hora del diseño de una plataforma marina se deben considerar dos condiciones ambientales principales: condiciones ambientales normales que son las condiciones que se espera que ocurran con frecuencia durante la construcción y durante toda la vida útil de la estructura, y condiciones ambientales extremas que son las condiciones que se producen muy raramente y que son muy importantes en la formulación de cargas de diseño.

2.4.1 Oleaje Marino

El oleaje marino son perturbaciones de un medio material, de las llamadas superficiales, que se propagan por la frontera de dos medios materiales, en este caso se trata del límite entre la atmosfera y el océano. En las olas se distinguen dos movimientos, el primero es la oscilación del medio movido por la onda, que en este caso puede ser un movimiento circular o un movimiento elíptico, y el segundo es la propagación de la onda que se produce porque la energía se trasmite con ella, trasladando el fenómeno con una dirección y velocidad.

Las olas impulsadas por el viento son un factor muy importante del medio ambiente debido a las fuerzas que estas aplican en la plataforma costa afuera. Estas ondas son irregulares en formas, varían en altura y longitud, y pueden acercarse a la estructura en una o varias direcciones simultáneamente. Es por ello, que la intensidad y la distribución de las fuerzas aplicadas por las olas son difíciles de determinar. Por esta complejidad el estudio de los efectos que estas fuerzas generan sobre la estructura son fundamentales para el diseño de la misma.

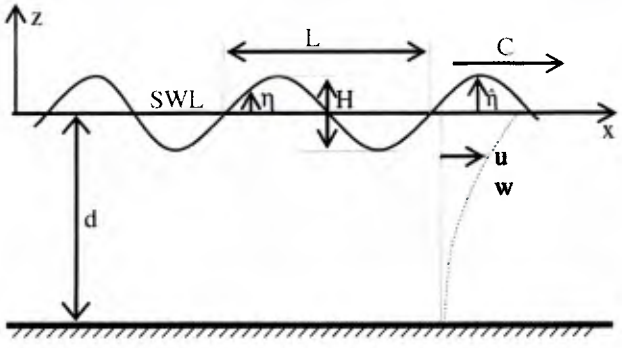


Figura 2.5: Perfil de una ola en 2D
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

Las cargas de estas ondas son dinámicas cíclicas por naturaleza, y debido a que el oleaje marino va a afectar a la estructura durante toda su vida útil, el principal efecto que este causa sobre las plataformas fijas costa afuera es el de fatiga en sus miembros estructurales y conexiones. El estudio de este fenómeno sobre las estructuras marinas y el análisis que se debe llevar a cabo del mismo es el tema principal de este trabajo especial de grado.

Las olas en el océano son generadas al azar en la naturaleza, sin embargo, las olas más grandes en una serie de ondas aleatorias pueden tener la forma de ondas regulares y pueden ser descritas por una teoría de ondas determinada. El uso de estas teorías son muy útiles para el diseño de una estructura marina. Existen parámetros necesarios para describir cualquier teoría de ondas, los cuales son:

- Periodo (T): Tiempo necesario para que dos crestas sucesivas pasen por un punto fijo.
- Altura (H): Distancia vertical entre la cresta y el valle siguiente.
- Amplitud (A): Distancia desde el nivel medio del agua hasta la cresta.
- Profundidad de agua (d): Distancia desde el nivel medio del agua al fondo del océano. Para las teorías de ondas el piso se supone horizontal y plano.
- Longitud de onda (L): Distancia horizontal entro dos crestas sucesivas.
- Frecuencia (f): Inverso del periodo.

- Velocidad horizontal de la partícula de agua (u): Velocidad instantánea a lo largo del eje de las abscisas (x).
- Aceleración horizontal de la partícula de agua (ů): Aceleración instantánea a los largo del eje de las abscisas (x).
- Altura significativa de la ola (H_s): Media aritmética de un tercio de las olas más altas en un registro de olas.
- Periodo medio de cruce por cero (T_z): Periodo medio de la superposición de grupos de ondas de distintos periodos medida entre los cruces con el eje de las abscisas.

Cuando se tienen estadísticas de olas agrupadas según sus características, por ejemplo su altura, y se tiene la distribución de dicha característica, se puede definir la función de densidad de probabilidad, la cual describe la probabilidad de que la altura de la ola sea usual. La función de densidad de probabilidad se puede obtener a través de la distribución Rayleigh o Gausiana.

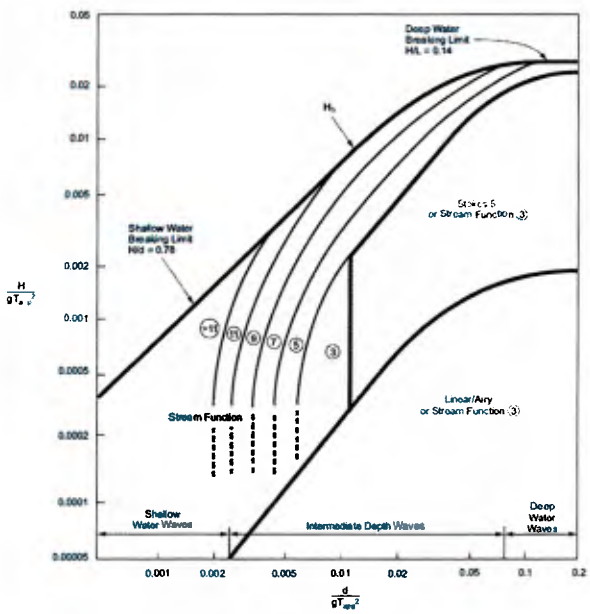


Figura 2.6: Clasificación de las teorías de oleaje según American Petroleum Institute.
Fuente: API, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design.

Según Karadeniz (2013), para describir correctamente el oleaje es importante conocer las condiciones generales de la superficie del agua en un cierto momento en la localización de estudio, la cual depende de múltiples factores meteorológicos, esto es conocido como estado marino. Para tener una descripción correcta del estado marino es necesario plotear el espectro del oleaje. Dos formas de espectro son usadas comúnmente para describir los estados marinos, el espectro de Pierson–Moskowitz y el espectro de JONSWAP. Ambos espectros se pueden obtener a partir de la altura significativa de la ola (H_s) y el periodo medio de cruce por cero (T_z).

Como se mencionó antes, las olas impulsadas por el viento generan cargas sobres los miembros y conexiones de las estructuras costa afuera, las cuales deben ser determinadas para estudiar el efecto que tienen sobre las mismas. Estas cargas se pueden determinar a partir de la ecuación de Morrison, la cual se escribe de la siguiente forma.

$$f = C_D|u|u + C_M\dot{u} \tag{2.1a}$$

Donde f es la fuerza que genera la ola, C_D es el constante de arrastre, C_M es el constante inercial, u y $\dot{u}$ son los componentes de velocidad y aceleración de la partícula de agua respectivamente. Las constantes de arrastre e inercial para miembros tubulares son definidas de la siguiente forma.

$$\begin{cases} C_D = D\rho_w c_d/2 \\ C_M = \pi D^2 \rho_w c_m/4 \end{cases} \tag{2.1b}$$

En donde D es el diámetro del miembro tubular, ρ_w es la densidad del agua, c_d y c_m son, respectivamente, los coeficientes de arrastre e inercial. Estos coeficientes son función del número de Reynolds (R_e), del número de Keulegan–Carpenter (K_c) y la rugosidad del cilindro. Las normas dan los valores estimados para estos coeficientes.

2.5 Procesos Estocásticos

Un proceso estocástico o proceso aleatorio, es un evento que varía en el tiempo y que no puede ser predicho o reproducido con detalle. Las cargas ambientales, a las que está sometida una estructura marina, son estocásticas en el tiempo. Este tipo de datos difícilmente distinguen las características de las respuestas, es por ello, que para hacerlos más accesibles y más fáciles de estudiar, la serie de datos en el tiempo se pasan al dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier, de este modo se obtiene como resultado un espectro con diferentes características de respuestas que puede ser visualizado de manera más sencilla.

2.5.1 Formulación de Fourier

La transformada de Fourier traslada un evento que varía en el tiempo a dominio de la frecuencia donde se asume que una señal aleatoria puede ser representada por una suma de ondas sinusoidales regulares a una amplitud, frecuencia y ángulo de fase específicos. En la Figura 2.7 se muestra un conjunto de ondas regulares y su respectiva sumatoria.

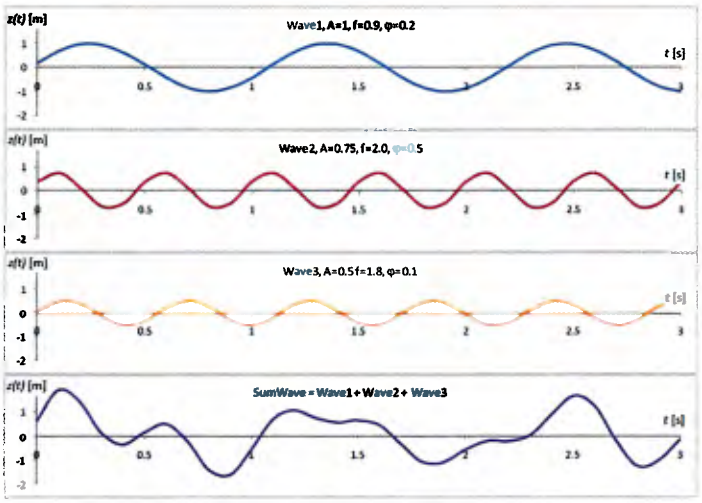


Figura 2.7: Tres Olas Regulares Sumadas en una Ola Irregular
Fuente: Tresna Dirgantara, T.2011. Study of Fatigue Design on Marine Current Turbine Support Structure. Tesis Mag. University of Southampton. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. P.2-3

Las ecuaciones matemáticas que representan las gráficas de la Figura 2.7 se escriben de la siguiente forma:

$$z\,(t) = A\,sen(2\pi f\,.\;t + \;\varphi\,) \tag{2.2a}$$

$$\sum z(t) = \sum_{n=1}^{N} A_n sen(2\pi f_n\,.\,t + \;\varphi_n) \tag{2.2b}$$

Dónde z es la elevación de la ola en un tiempo t, A es la amplitud de la ola, f es la frecuencia y φ es el ángulo de fase.

Regresando la secuencia y asumiendo que la sumatoria de las ondas regulares o la onda irregular está disponible, la Transformada de Fourier se podría utilizar para dividirla en varias ondas regulares individuales como se muestra en la ecuación (2.3) y (2.4).

$$z(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{N} \{A_n cos(2\pi f_n t) + B_n sen(2\pi f_n t)\} \tag{2.3}$$

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T z(t)\cos(2\pi f_n t)\,dt \quad \text{y} \quad B_n = \frac{2}{T}\int_0^T z(t) sen(2\pi f_n t) dt \tag{2.4}$$

Dónde A_0 es la amplitud media de la ola, A_n y B_n son los coeficientes de Fourier, f_n es la frecuencia de la ola para cada componente n y T periodo de la medición,

La transformada de Fourier de la amplitud de la ola como una función de frecuencia se muestra en la Figura 2.8, la cual es derivada de la ola irregular en la Figura 2.7. Todos los valores son iguales a cero excepto las frecuencias de 0.9, 1.8 y 2.0 las cuales tienen una amplitud respectiva de 1, 0.5 y 0.75. Para cada ángulo de fase, en las frecuencias intermedias, una dispersión aleatoria de ángulo se aplica mientras que otros son exactamente de la misma

como valor de entrada. Si toda la información de la transformada de Fourier está disponible, una nueva sumatoria de ondas harmónicas puede ser creada a una exacta configuración a la anterior.

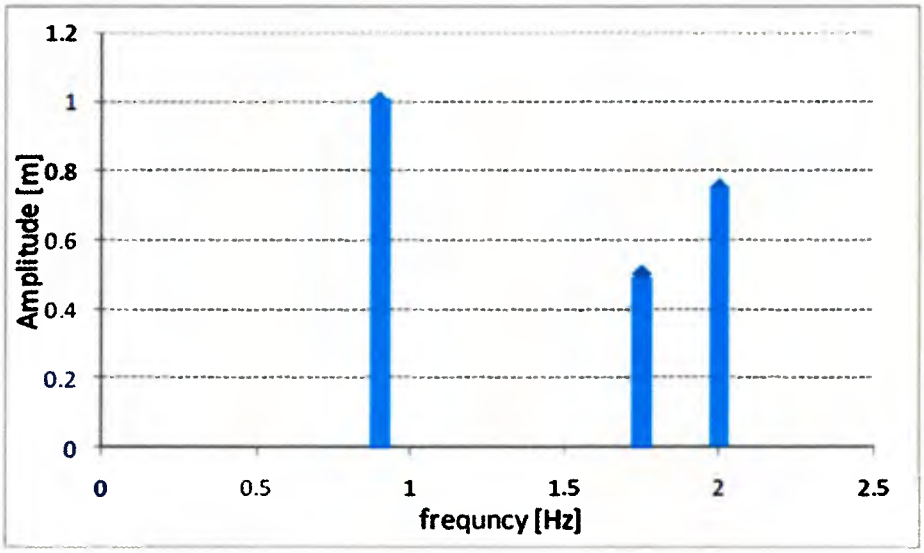


Figura 2.8: Amplitud vs Frecuencia como resultado de la Transformada de Fourier
Fuente: Tresna Dirgantara, T.2011. Study of Fatigue Design on Marine Current Turbine Support Structure. Tesis Mag. University of Southampton. Faculty of Civil Engineering and Geosciences. P.2-4

2.5.2 Transformada Rápida de Fourier

Otra forma de trasladar una serie en el tiempo al dominio de la frecuencia, es a través de la transformada rápida de Fourier. El uso de este método además ayuda a determinar la densidad espectral de potencia (DEP) la cual es una función matemática que nos permite conocer la distribución de la potencia de una señal sobre las distintas frecuencias, es por ello que la DEP es muy útil en la ingeniería para señales que describen procesos físicos estacionarios. A partir de las formas espectrales mencionadas en la sección anterior (el espectro de Pierson–Moskowitz y el espectro de JONSWAP), que son muy usadas para describir los estados marinos, es posible obtener una serie de ondas en función del tiempo a

través de la inversa de la transformada rápida de Fourier. Sin embargo, este método no podrá crear una copia exacta de la serie de ondas en el tiempo de la cual ese espectro fue creado.

2.6 Fatiga

La fatiga es un importante fenómeno que causa daños y fallas principalmente alrededor de las soldaduras donde se conectan los miembros de las estructuras costa afuera. Este fenómeno ocurre por la concentración de altas tenciones en un punto bajo la aplicación de cargas continuas a largo plazo, resultando eventualmente en la reducción de las resistencias locales (Karadeniz, 2013). En el caso de las estructuras costa afueras estas cargas vienen del ambiente, siendo la principal las olas del mar. Además de esto, sumándole los efectos de la corrosión que el medio ambiente puede causar sobre los miembros de la estructura, la fatiga se convierte en uno de los principales problemas que causan la degradación de la integridad de la estructura a largo de su vida útil.

Forrest (1962) señala que:

> El fallo de los metales por fatiga tiene lugar por las cargas aplicadas en forma variable o repetida. La carga máxima requerida para producir fallos de esta forma es mucho menor que la carga de rotura elástica. Muchos componentes y estructuras, en servicio, están sometidos a cargas variables y si bien los esfuerzos promedios son a menudo bajos, las concentraciones locales de tensiones, que no reducen mucho la resistencia estática, pueden a veces producir fallos por fatiga. Realmente, el mayor número de fallos en servicio son debido a la fatiga y realmente pocos a fallos estáticos. (p.13)

El uso de plataformas costa afuera en ambientes más hostiles y océanos más profundos requiere que las estructuras sean relativamente más flexibles y dinámicamente sensibles. Para estas estructuras, los daños acumulados por fatiga y consecuentemente las fallas por fatiga son más importantes ya que las fluctuaciones de tensiones con largas amplitudes causan la falla en periodos más cortos. Teniendo en cuenta que la fatiga es uno de los criterios más importante

para el diseño de una estructura costa afuera, este requiere un sofisticado y avanzado método de análisis que sea llevado de la manera apropiada para mantener la integridad a largo plazo de las soldaduras en las conexiones de la estructura. Sin embargo la fatiga es un fenómeno complejo del que poco se sabe en cuanto a los daños que puede traer en el tiempo bajo cargas aleatorias, y asimismo depende de muchos factores que se mencionaran más adelante.

La falla por fatiga resulta en daños catastróficos que ocurren sin aviso previo, esta es la característica más notable de este tipo de fallas, debido a la falta de deformación en la región de las fracturas, incluso en materiales bastantes dúctiles como el acero suave, no hay ningún indicio de un fallo inminente. Los procesos físicos de la falla por fatiga ocurren esencialmente en tres etapas, la primera etapa es el inicio y formación de la grieta, la segunda etapa es crecimiento estable y propagación de la grieta y la tercera etapa finalmente se da el crecimiento inestable de la grieta hasta la ruptura. En la Figura 2.9 se podrá observar gráficamente las tres etapas de los procesos físicos que ocurren en la falla por fatiga.

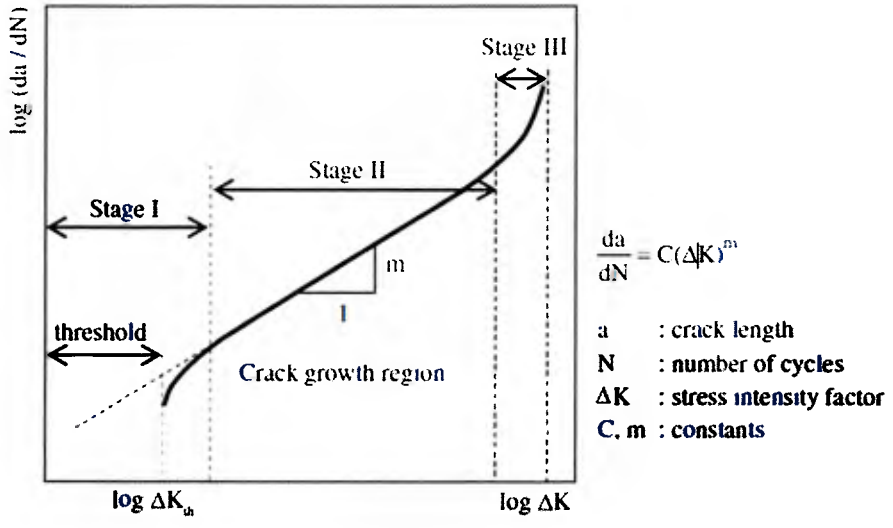


Figura 2.9: Crecimiento de la grieta en materiales bajo procesos de tensiones cíclicas
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

En la figura 2.9 se observa que para el proceso de formación de una grieta primero se tiene un umbral en la primera etapa, es decir, $\Delta K \leq \Delta K_{th}$ donde ΔK es el factor de intensidad de

tensiones y ΔK_{th} es el factor de intensidad de tensiones del umbral. En este punto la grieta no se ha propagado y la resistencia a la fatiga es infinita. La segunda etapa representa la propagación de la grieta la cual sigue un crecimiento lineal a escala logarítmica. Por último en la tercera etapa aumenta la aceleración de propagación de la grieta hasta llegar al factor de intensidad de tensiones máxima ΔK_{max}

Es muy común encontrar que las grietas producto de la fatiga se inicien en alguna discontinuidad de la superficie, esto es debido a que cualquier cambio de la sección produce una concentración de tenciones. Es por ello que en las plataformas costa fuera el punto más sensible donde se pueda iniciar una grieta es en el pie de las soldaduras en las conexiones, como se muestra en la Figura 2.10.

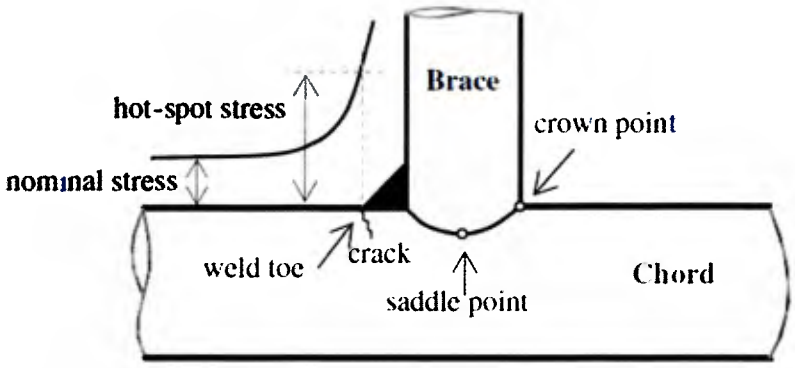


Figura 2.10: Conexión tubular T donde se define punto de vulnerabilidad de inicio de la grieta
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

En el ejemplo de la Figura 2.10 se puede observar una conexión T de dos miembros tubulares, en donde la grieta por fatiga inicia al pie de la soldadura, que es el punto donde hay mayor concentración de tensiones. Esta grieta microscópica crece gradualmente a través del espesor y a lo largo de la circunferencia del miembro tensionado. El punto de concentración de altas tensiones al pie de la soldadura se le conoce como *hotspot*.

Los efectos corrosivos sobre la superficie de los miembros de la estructura pueden provocar pérdidas considerables de la resistencia del material, y la combinación de este efecto junto con los esfuerzos fluctuantes provenientes de las cargan ambientales pueden ser fatales para la integridad de la estructura. Debido a esto, la corrosión es un factor que se debe evitar en la estructura a través del uso de protección catódica. En general, la mejor forma de controlar la fatiga en las estructuras marinas, es a través de inspecciones anuales, donde se monitorea el estado de la estructura y la formación de grietas en las zonas más afectadas.

Como se ha podido observar, el estudio de las fallas por fatiga consiste básicamente en el estudio de los puntos donde se pueden producir altas concentraciones de tensiones causadas por la aplicación de cargas cíclicas, que van a llevar a la formación de grietas las cuales se van a ir propagando hasta que el área de la sección trasversal remanente no soporte la tensión aplicada, produciendo así una falla por fatiga. Sabiendo esto, si se desea diseñar una máquina que soporte la falla por fatiga, lo que se busca es mantener los niveles de tensiones por debajo de los límites resistentes del material, conociendo los esfuerzos fluctuantes a los que va a estar sometido, las cuales serán similares a lo largo de su vida útil. Pero este mismo concepto no se puede aplicar a una estructura marina, ya que dichas estructuras están sujetas a combinaciones de cargas de altas y bajas amplitudes y tampoco se puede limitar los niveles de esfuerzos. Es por eso que se debe buscar la forma de estimar la vida útil por fatiga de la estructura que no sea por los límites resistentes.

2.6.1 Mecánica de la Fractura Enfocada a Predecir los Daños por Fatiga

El estudio de la mecánica de la fractura puede ser usado para el diseño de estructuras costa afuera ya que logra proveer las bases para la predicción de la resistencia a la fatiga, e incluso se puede usar para tomar decisiones a la hora de inspeccionar o reparar un miembro que haya sufrido daños por fatiga. El concepto fundamental del estudio de la mecánica de la fractura es la caracterización de las tensiones en términos de un solo parámetro, ΔK, que como se mencionó antes es llamado factor de intensidad de tensiones. Este parámetro está

relacionado a la tensión σ y al tamaño de la grieta a. Para una placa infinita con grietas de diferentes geometrías, bajo un esfuerzo uniforme σ, los factores de intensidad de tensiones se muestran en la Figura 2.11

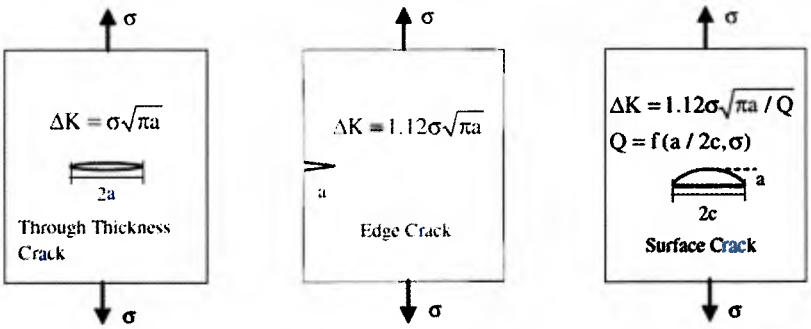


Figura 2.11: Factores de intensidad de tensiones para grietas de diferentes geometrías
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

En una conexión tubular soldada este concepto es un poco más complejo debido a la geometría y a los casos de cargas. Por lo tanto el factor de intensidad de tensiones para conexiones tubulares soldadas debería tomar en cuenta el efecto de la geometría y de la complejidad de las cargas. Esto se consigue definiendo el rango del factor de intensidad de tensiones escrito como.

$$\Delta K = \Delta S_h \, Y \sqrt{\pi a} \tag{2.5}$$

En donde Y es un función de corrección que toma en cuenta la superficie frontal libre, anchura de plancha finita, geometría de la grieta, campo de esfuerzo no uniforme, discontinuidad de la geometría, y cambios en la restricción estructural. El parámetro a es el tamaño de la grieta y ΔS_h es el rango de tensiones o esfuerzos en el *hotspot*. Para conexiones tubulares soldadas, existen diferentes métodos de análisis que pueden ayudar a obtener la función de corrección Y usando diferentes soluciones del factor de intensidad de tensiones para grietas en superficies semielípticas. La expresión de Y se puede obtener a partir de curvas obtenidas de datos experimentales ya que depende del tamaño de la grieta a, el espesor del

miembro y el esfuerzo aplicado. También el método de elementos finitos puede ser usado para calcular ΔK para conexiones tubulares.

Una vez conocida el factor de intensidad de tensiones, se debe estimar el crecimiento

de la grieta para daños acumulativos por fatiga. Para este propósito, es comúnmente usada la ley de Paris – Erdogan la cual viene dada por la siguiente formula.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{2.6}$$

Donde C y m son constantes que dependen del material obtenidas experimentalmente y N es el número de ciclos de los esfuerzos. Introduciendo la ecuación (2.5) en la ecuación (2.6), para un rango de esfuerzo constante ΔS_h, la expresión para la resistencia a la fatiga o número de ciclos para la falla por fatiga N puede ser calculada de la integración de la ecuación (2.6) la cual será.

$$N = \frac{\left(\Delta S_h \sqrt{\pi}\right)^{-m}}{C} \int_{a_i}^{a_f} \left(Y\sqrt{a}\right)^{-m} da \tag{2.7}$$

Donde a_i y a_f son el tamaño inicial y final de la grieta respectivamente.

Para un rango de tensiones de amplitudes variables, un procedimiento incremental puede ser aplicado para estimar el crecimiento de la grieta con un rango de esfuerzos equivalente denotado como ΔS_{eq}. Para un rango de esfuerzos ΔS_j el incremento infinitesimal del tamaño de una grieta $d(\Delta a_j)$ puede ser expresado usando las ecuaciones (2.5) y (2.6) al escribirse como.

$$d(\Delta a_j) = C\left(Y\sqrt{\pi a}\right)^m \left(\Delta S_j\right)^m d(\Delta N_j) \tag{2.8}$$

En el cual $d(\Delta N_j)$ corresponde al incremento infinitesimal del número de ciclos para que ocurra la falla para un rango de esfuerzos ΔS_j. El diferencial del tamaño de la grieta, da, se obtiene por la sumatoria del incremento infinitesimal del tamaño de la grieta, $d(\Delta a_j)$, para todos los rangos de esfuerzos, y se escribe como.

$$da = \sum_{j=1}^{k} d(\Delta a_j) \rightarrow da = C\left(Y\sqrt{\pi a}\right)^m \sum_{j=1}^{k} (\Delta S_j)^m d(\Delta N_j) \qquad (2.9a)$$

Donde k es el número de diferentes rangos de esfuerzos aplicados. Dividiendo la ecuación (2.9a) entre el diferencial de numero de ciclos de esfuerzos, dN, la ley dada por la ecuación (2.6) puede ser expresada como.

$$\frac{da}{dN} = C\left(Y\sqrt{\pi a}\right)^m \sum_{j=1}^{k} (\Delta S_j)^m \left(\frac{d(\Delta N_j)}{dN}\right) \quad con \quad dN = \sum_{j=1}^{k} d(\Delta N_j) \qquad (2.9b)$$

La razón, $d(\Delta N_j) / dN$, en la ecuación (2.9b) es simplemente la probabilidad, $P(\Delta S_j)$, para que el rango de esfuerzos ΔS_j ocurre durante la vida útil. Por lo tanto, la ecuación (2.9b) puede ser reescrita como.

$$\frac{da}{dN} = C(Y\sqrt{\pi a})^m \sum_{j=1}^{k} (\Delta S_j)^m P(\Delta S_j) = C\left(\Delta S_{eq} Y\sqrt{\pi a}\right)^m \qquad (2.10a)$$

En la cual ΔS_{eq} es el rango de esfuerzo equivalente definido como.

$$\Delta S_{eq} = \left(\sum_{j=1}^{k} (\Delta S_j)^m P(\Delta S_j)\right)^{\frac{1}{m}} = \left(\int_0^{\infty} s^m f_{\Delta S_h}(s) ds\right)^{\frac{1}{m}} \qquad (2.10b)$$

La función $f_{\Delta Sh}(s)$ de la ecuación (2.10b) es la función de densidad de probabilidad del rango de esfuerzos variables ΔS_h. Esta técnica de rango de esfuerzos equivalentes asume que el material es constante y por lo tanto C y m también son constantes para todos los rangos de esfuerzos, es decir, una función lineal simple es usada por todos los rangos de esfuerzos para representar el rango de crecimiento de la grieta en escala logarítmica. Sin embargo, si para representar cada rango de esfuerzo se aplica una función lineal diferente (representación del crecimiento de la grieta con múltiples segmentos) entonces se define el concepto de crecimiento de grieta equivalente. En este caso, para un segmento j, las constantes del material son denotados como C_j y m_j. Para un rango de esfuerzos ΔS_h en la región del segmento j, con limites inferior y superior, es decir ($\Delta S_{j-1} \leq \Delta S_h \leq \Delta S_j$), la contribución del rango de crecimiento de la grieta puede ser escrito como.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_j = C_j\left(Y\sqrt{\pi a}\right)^{m_j}(\Delta S_h)^{m_j}P\left(\Delta S_{j-1} \leq \Delta S_h \leq \Delta S_j\right) \qquad (2.11a)$$

Donde $P(.)$ es la probabilidad que el rango de esfuerzos ΔS_h este dentro de los limites superiores e inferiores definidos anteriormente. Para todos los segmentos, el rango total de crecimiento de la grieta es calculado por superposición de cada segmento individual. Dicha expresión será la siguiente.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{AV} = \sum_{j=1}^{k} C_j\left(Y\sqrt{\pi a}\right)^{m_j} \int_{\Delta S_{j-1}}^{\Delta S_j} s^{m_j} f_{\Delta S_h}(s)\,ds \qquad (2.11b)$$

Donde $f_{\Delta Sh}(s)$ es la función de densidad de probabilidad del rango de esfuerzos variables ΔS_h, k es el número de segmentos y $(da/dN)_{AV}$ es el promedio del rango de crecimiento de la grieta para todos los rangos de esfuerzos aplicados. Usando este valor promedio, la resistencia a la fatiga es calculada por la siguiente integración.

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{(da/dN)_{AV}} \tag{2.12}$$

En el cual *ai* y *af* son el tamaño inicial y final de la grieta respectivamente. Introduciendo $(da/dN)_{AV}$ de la ecuación (2.11b) dentro de la ecuación (2.12), la resistencia a la fatiga o el número de ciclos para que ocurra fallo por fatiga N puede ser numéricamente calculado.

2.6.2 Curva S-N Enfocada a Predecir los Daños por Fatiga

Para el diseño de las estructuras marinas contra la falla por fatiga es necesario estimar la resistencia a la fatiga de la estructura. Para llevar a cabo esta estimación es necesario el conocimiento y el uso de la curva S–N. Los datos de esta curva se basan en resultados experimentales realizados en distintas muestras. En este enfoque, N viene siendo el número de ciclos para que ocurra la fractura o la resistencia a la fatiga, la cual es inversamente proporcional al rango de esfuerzos de amplitud constante S_h. La ecuación que describe el comportamiento de la curva S–N es la siguiente.

$$N = C{S_h}^{-k} \tag{2.13}$$

Donde C y k son constantes del material obtenidas experimentalmente. En escala logarítmica, la ecuación (2.13) es una función lineal la cual se escribe de la siguiente forma.

$$\ln N = \ln C - k \ln S_h \tag{2.14}$$

El enfoque de la curva S–N es el más usado en la práctica para el diseño de estructuras costa afuera por fallas de fatiga, además de que se encuentra bien descrito en las normas. Otro enfoque que se le puede dar, es el uso de una curva S–N con múltiples segmentos para un mejor ajuste de la curva y así obtener resultados más exactos. Este modelo de segmentos

múltiples permite conocer un límite de resistencia en los que los rangos de esfuerzos no producen daños por fatiga. La curva S–N para un segmento *j* es definido de la siguiente forma.

$$N_j = C_j S_h^{-k_j} \rightarrow (S_h)_j \leq S_h \leq (S_h)_{j+1} \tag{2.15}$$

Cada segmento tendrá sus propias constantes C_j y k_j, y en consecuencia una resistencia a la fatiga N_j para un rango de esfuerzos de amplitudes constantes S_h. En la práctica, las tensiones o esfuerzos en los *hotspots* son definidos en términos de un rango de esfuerzo nominal S_j multiplicado por un *factor de concentración de esfuerzos* (SCF) fijado como.

$$S_h = (SCF \times S_j) \tag{2.16}$$

La Figura 2.12 muestra una curva S–N lineal y un modelo de curva S–N de múltiples segmentos.

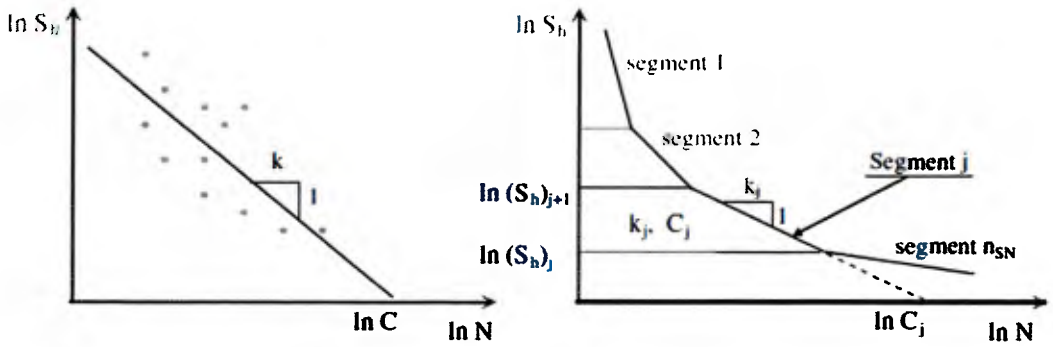


Figura 2.12: modelos de curvas S–N lineal y de múltiples segmentos
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

En los cálculos de daños por fatiga, el esfuerzo nominal se calcula en dirección normal al pie de la soldadura, además de que tanto este, como el factor SCF, dependen del tipo de conexión y las dimensiones del miembro. En la realidad, para estructuras marinas se conoce que el valor de *k*, que como se pudo observar viene siendo la pendiente de la curva S–N, cambia después de los 10^7 ciclos, es decir, que para estudios preliminares la curva se puede

considerar lineal. Si se desea estimar la resistencia a la fatiga el estudio de esta curva se debe hacer más allá de este número de ciclos.

2.6.3 Regla de Daño Acumulativo por Fatiga

Cuando se está diseñando una estructura costa afuera para que aguante las fallas por fatiga, las curvas S–N son generadas para ser bastante conservadoras y esto es ventajoso, ya que coloca el diseño del lado de la seguridad. Por otro lado, una de las desventajas de estas curvas es que son calculadas para cargas de amplitudes constantes, y en la realidad las amplitudes de las cargas varían de acuerdo a las fuerzas ambientales. Para manejar esta desventaja se puede aplicar la regla de Palmgren–Miner, que es usada para la estimación de daños por fatiga en plataformas costa afuera cuando hay variación en amplitudes de las cargas que van a afectar a la estructura. Esta regla asume que hay una acumulación lineal de daños por fatiga para diferentes rangos de esfuerzos o tensiones.

Los daños causados por fatiga en una junta o conexión, bajo n número de ciclos para una carga de amplitud constante S_h, viene dado por.

$$D = \frac{n}{N} \tag{2.17a}$$

Donde N es el número de ciclos obtenido de la curva S–N para la carga o esfuerzo de amplitud constante S_h (es decir: $N = C(S_h)^{-k}$). Si la junta o conexión está sometida a cargas o esfuerzos de diferentes amplitudes, entonces los ciclos de cargas deberán derivarse en grupos. Estos grupos deberán tener aproximadamente el mismo rango de esfuerzos. Si se tiene un número q de grupos, entonces para cada grupo se tendrá un n_j por cada carga o rango de esfuerzo S_j. Por lo tanto el daño de cada grupo individual será.

$$D_j = \frac{n_j}{N_j} \tag{2.17b}$$

Finalmente, para encontrar los daños por fatiga de todos los grupos se realiza una sumatoria de los daños individuales de cada grupo, ya que anteriormente se dijo que esta regla asume una acumulación de daños lineal. Entonces la ecuación de daños acumulativo total será.

$$D = \sum_{j=1}^{q} \frac{n_j}{N_j} \tag{2.18}$$

Como el daño total D es una fracción entre el trabajo de la carga cíclicas y la falla de las misma, se asume que la falla por fatiga ocurrirá cuando esta fracción alcance la unidad, es decir, cuando $D = 1$, teóricamente. En general si denotamos que el valor último para que ocurra la falla es D_f, entonces la falla por fatiga ocurrirá cuando el daño total D exceda o sea igual el valor último D_f, es decir cuando $D \geq D_f$.

La Figura 2.13 nos muestra un ejemplo de cómo sería la división de grupos de esfuerzos de diferentes amplitudes y su correspondiente curva S–N de resistencia a la fatiga.

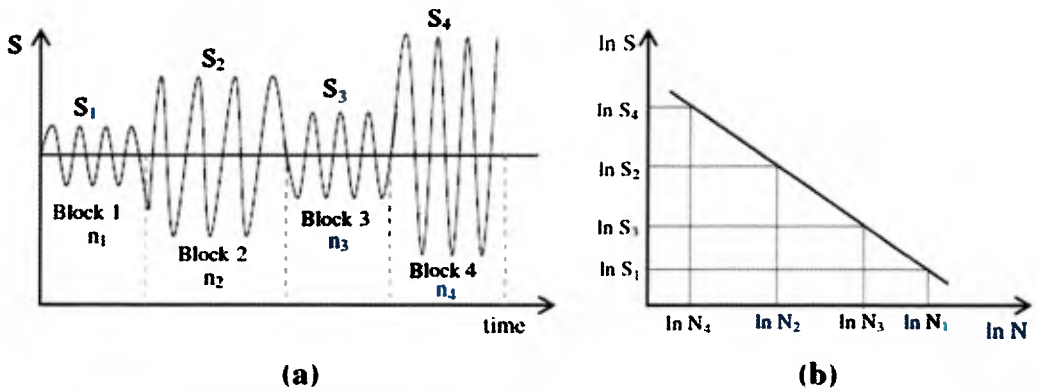


Figura 2.13: a. Grupos de esfuerzos **b.** Curva S–N
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

Investigaciones han demostrado que el valor de D_f, el cual teóricamente es la unidad, puede variar bajo circunstancias realistas. El valor que se le asigne a D_f será determinado por lo que establezca la norma que se esté utilizando para el diseño de la estructura costa afuera.

También se ha reportado que para secuencias de cargas que van de bajas amplitudes a altas amplitudes, el valor de D_f tiende a ser mayor que la unidad, y para el caso contrario, secuencias de cargas que van de altas amplitudes a bajas amplitudes el valor de D_f es menor a la unidad. Esto hace resaltar que una limitación de la regla de daño acumulativo es que no toma en cuenta el efecto de la secuencia de las cargas.

2.7 Método de Conteo de Ciclos

En el caso que se tenga de amplitudes de esfuerzos variables, el rango de esfuerzos y el número de ciclos no son tan sencillos de definir. En la práctica, el historial de esfuerzos en el tiempo de las estructuras marinas bajo cargas cíclicas provenientes de las olas tiene secuencias aleatorias, por lo tanto, los ciclos de esfuerzos y sus rangos correspondientes solo pueden ser determinados por conteo de algoritmos. El problema principal de los métodos de conteos es que el historial de esfuerzos o tensiones debe estar disponible en el dominio del tiempo mediante registros, simulación numérica u obtenido de un análisis dinámico. Asimismo, para poder aplicar el conteo de ciclos por algoritmos, el historial de esfuerzos debe ser generado de su espectro correspondiente. Varios métodos han sido propuestos para el conteo de los ciclos de esfuerzos, el comúnmente más usado y aceptados por las normas es el conteo de flujo de lluvia (Rainflow Counting) el cual es ideal cuando se está estudiando un historial de esfuerzos largo y complejo. Se ha comprobado que el método de flujo de la lluvia es generalmente el mejor estimador de daño por fatiga, y por lo tanto, es ampliamente usado en la práctica.

2.7.1 Conteo de Flujo de Lluvia (Rainflow Counting)

Este método fue propuesto por M. Matsuishi y Tatsuo Endo en 1968, y permite determinar los rangos y ciclos de esfuerzos a lo largo del tiempo. Obtiene su nombre de la analogía con la lluvia cayendo sobre un techo inclinado. Como ya se sabe, el daño acumulativo de las cargas cíclicas provenientes del oleaje se ve afectado por la secuencia de

las cargas, tanto las cargas como la secuencia son aleatorias. Así, el método de flujo de lluvia no toma en cuenta la secuencia de la carga para reducir la sumatoria de la regla de Palmgren–Miner de daño acumulativo, aunque se han hechos modificaciones para poder eliminar este inconveniente.

El principio del método de flujo de lluvia se basa en la visualización del flujo de la lluvia bajando por una secuencia de techos inclinados, esencialmente, cuenta cada medio ciclo. Para simular la secuencia de techos inclinados se debe tener una gráfica de la variación de esfuerzos en el tiempo, y que los picos y valles estén conectados por líneas rectas, como se muestra en la Figura 2.14 (b).

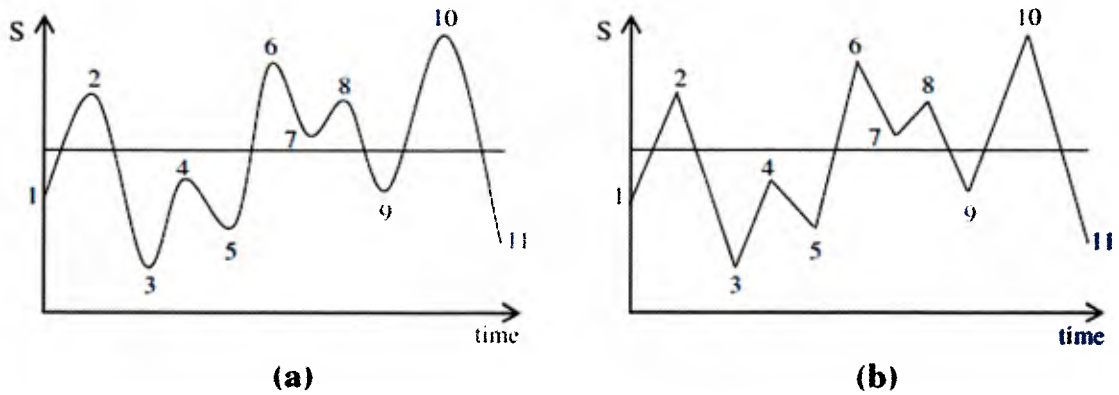
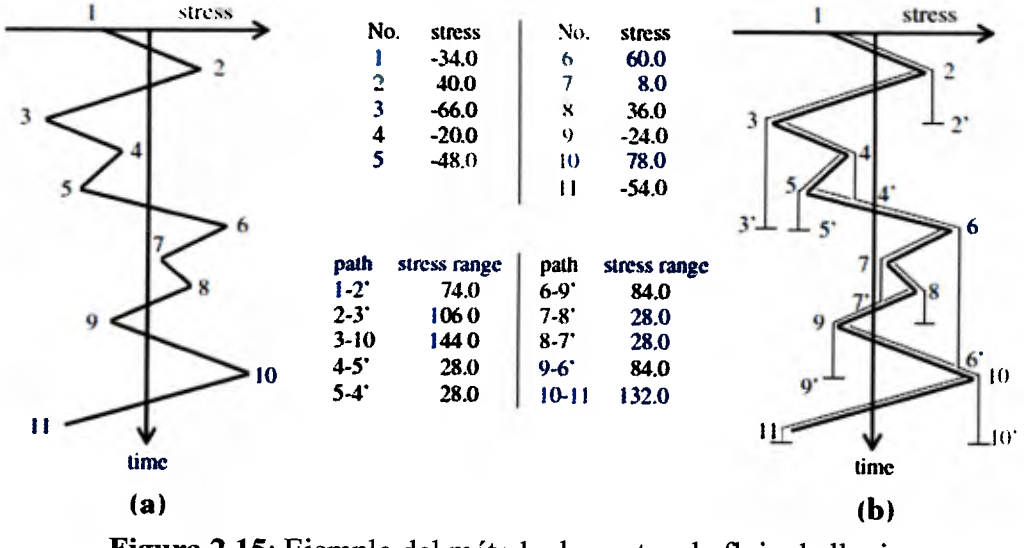


Figura 2.14: Ejemplo de un historial de esfuerzos en el tiempo y su modelo equivalente de líneas rectas.
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz

Una vez se tenga el modelo equivalente donde los picos y valles están unidos por líneas rectas, el grafico es rotado 90° en sentido horario, de tal forma que el eje del tiempo quede vertical con el origen en la parte superior y el lado positivo hacia abajo, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.15 (a). En dicho ejemplo los números impares denotan los valles y los números pares denotan los picos. El flujo de la lluvia inicia en cada pico o valle y se mantiene bajando por el techo hasta que se detenga de acuerdo a las siguientes condiciones.

- El flujo va a descender por la derecha del valle o por la izquierda del pico sobre el techo subsiguiente.
- Cuando el flujo inicia en un valle, este se detiene hasta que encuentra otro valle igual o más profundo que el que inicia, por ejemplo, recorrido (1-2-2') de la Figura 2.15 (b). Si se encuentra otro techo, seguirá bajando hasta que la condición para que se detenga se cumpla, por ejemplo, el recorrido (3-4-4'-6-6'-10-10') en la Figura 2.15 (b). El flujo también se detiene cuando se encuentra otro flujo de un recorrido anterior, por ejemplo, el recorrido (5-4') en la Figura 2.15 (b).
- Las mismas condiciones y reglas anteriores se cumplen para los picos.
- El flujo se detiene cuando alcanza el final del registro del historial de esfuerzos.
- La distancia horizontal de cada flujo será el rango de esfuerzo de amplitud constante y se cuenta como medio ciclo.

La Figura 2.15 muestra un ejemplo de cómo serían los recorridos y sus correspondientes rangos de esfuerzos para un historial de esfuerzos dado.



No.	stress	No.	stress
1	-34.0	6	60.0
2	40.0	7	8.0
3	-66.0	8	36.0
4	-20.0	9	-24.0
5	-48.0	10	78.0
		11	-54.0

path	stress range	path	stress range
1-2'	74.0	6-9'	84.0
2-3'	106 0	7-8'	28.0
3-10	144 0	8-7'	28.0
4-5'	28.0	9-6'	84.0
5-4'	28.0	10-11	132.0

Figura 2.15: Ejemplo del método de conteo de flujo de lluvia
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz.

Los métodos de análisis de fatiga para estructuras marinas aplican la regla de Palmgren–Miner de daños acumulados, donde las cargas que van a actuar sobre la estructura se agrupan en casos y para cada caso o grupo se tiene un numero de ciclos para un periodo de tiempo. Finalmente la estructura es analizada determinando el esfuerzo de cada caso o grupo y luego se estima el daño total para un periodo de tiempo. Cuando una estructura se encuentra sometida a cargas dinámicas y se encuentra excitada cerca de su periodo natural, pequeños cambios en asumidos periodos de carga pueden afectar los resultados significativamente.

2.8 Distribución Probabilística de Rangos de Esfuerzos Aleatorios

Como ocurre en el análisis estructural de una plataforma costa afuera, el proceso de tensiones del sistema de la estructura es usualmente estocástico debido a la aleatoriedad de las cargas ambientales o los fenómenos de las condiciones de carga. Para los procesos de tensiones de bandas estrechas la probabilidad de distribución de los picos sigue la distribución de Rayleigh. Para los procesos de tensiones de bandas anchas, la probabilidad de distribución de los picos se aproxima a ser Gaussiana, cuando el parámetro de ancho de banda se aproxima a la unidad. En la práctica, para estructuras marinas la distribución de los picos no será ni Rayleigh ni Gaussiana. Entonces, para el estudio de distribución de anchos de bandas en plataformas costa afuera, se utiliza el concepto de factor de corrección de daños.

Dado que la probabilidad de distribución de esfuerzos máximos es una combinación del tipo Gaussiano y del tipo Rayleigh, una formulación similar puede ser usada para la distribución de esfuerzos. Como la distribución Rayleigh es un caso especial de la distribución Weibull, por lo general, se asume que la probabilidad de distribución de los rangos de esfuerzos puede ser definido como la suma de la distribución Gaussiana y Weibull. Así la función de distribución es escrita como.

$$F_s(x) = F_{gs}(x) + F_{ws}(x) \quad \rightarrow \quad (x = S/\sqrt{m_0}) \tag{2.19a}$$

Donde $F_{gs}(x)$ es la distribución tipo Gaussiana y $F_{ws}(x)$ es la distribución tipo Weibull, x denota el rango de esfuerzos normalizado, S es el rango de esfuerzos y m_0 es el momento espectral cero. Cada una de las distribuciones se escribirá como.

$$F_{gs}(x) = \varepsilon^2 \mathrm{erf}\left(\frac{x}{A\varepsilon\sqrt{2}}\right) \rightarrow (0 \leq x \leq \infty)$$

$$F_{ws}(x) = \alpha\left[\alpha \mathrm{erf}\left(\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{x}{B}\right)^{C/2}\right) - \exp\left(-\left(\frac{x}{B}\right)^{C}\right)\mathrm{erf}\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\left(\frac{x}{B}\right)^{C/2}\right)\right] \rightarrow \alpha = \sqrt{1-\varepsilon^2}$$

(2.19b)

En donde ε es el ancho de banda, A, B y C son parámetros a ser determinados, y erf(.) denota la función error. En el caso extremo, cuando $\varepsilon = 1$ y $\varepsilon = 0$, la función $F_s(x)$ se convierte, respectivamente, en una distribución del tipo Gaussiana o del tipo Weibull, las cuales serán.

$$F_s(x) = \mathrm{erf}\left(\frac{x}{A\sqrt{2}}\right) = 2\Phi\left(\frac{x}{A}\right) - 1 \quad \rightarrow \quad \text{para } (\varepsilon = 1): \text{ Gaussiano}$$

$$F_s(x) = \left[1 - exp\left(-\left(\frac{x}{B}\right)^{C}\right)\right] \quad \rightarrow \quad \text{para } (\varepsilon = 0): \text{ Weibull} \qquad \textbf{(2.20)}$$

En donde $\Phi(.)$ denota la función de distribución acumulativa normal. En el caso donde $\varepsilon = 0$ y $C = 2$, la función $F_s(x)$ se convierte en una distribución Rayleigh. La función de densidad de probabilidad (PDF) del rango de esfuerzos normalizado x se obtiene de la derivada de la ecuación (2.19a) y se escribe como.

$$f_s(x) = \frac{\partial F_{gs}(x)}{\partial x} + \frac{\partial F_{ws}(x)}{\partial x} = \left(f_{gs}(x) + f_{ws}(x)\right) \qquad (2.21a)$$

Donde $f_{gs}(x)$ y $f_{ws}(x)$ denotan, respectivamente, la función de densidad del tipo Gaussiana y Weibull, las cuales se escriben como.

$$f_{gs}(x) = \frac{2\varepsilon}{A\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2A^2\varepsilon^2}\right) \rightarrow (0 \leq x \leq \infty)$$

$$f_{ws} = \alpha \frac{C}{B}\left(\frac{x}{B}\right)^{C-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{B}\right)^{C}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\left(\frac{x}{B}\right)^{C/2}\right) \rightarrow \alpha = \sqrt{1-\varepsilon^2} \qquad (2.21b)$$

La cuales se encuentran definidas para todos los valores positivos de x, es decir ($0 \leq x \leq \infty$). Para valores extremos de ε, el PDF del rango de esfuerzos x se escriben como.

$$f_s(x) = \frac{2}{A\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2A^2}\right) \rightarrow \text{para } (\varepsilon = 1) : \text{Gaussiano} \qquad (2.22a)$$

$$f_s(x) = \frac{C}{B}\left(\frac{x}{B}\right)^{C-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{B}\right)^{C}\right) \rightarrow \text{para } (\varepsilon = 0) : \text{Weibull} \qquad (2.22b)$$

Para el cálculo del momento de distribución probabilística del rango de esfuerzos, se debe usar la siguiente formula.

$$M_n = \int_0^\infty x^n f_s(x)dx = \int_0^\infty x^n \left(f_{gs}(x) + f_{ws}(x)\right) dx \qquad (2.23a)$$

Conociendo $f_{gs}(x)$ y $f_{ws}(x)$ de las ecuaciones (2.21b) e introduciéndolas en la ecuación (2.23a), el momento para ($n = 0, 1, 2, \ldots, m$) se puede obtener como lo establece la siguiente formula.

$$M_n = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\sqrt{2}A\right)^n \varepsilon^{n+2}\Gamma\left(\frac{1}{2}(n+1)\right) + J_n$$

$$J_n = B^n \alpha \int_0^\infty y^{n/c} \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{y}\right) e^{-y} dy \rightarrow \alpha = \sqrt{1-\varepsilon^2} \qquad (2.23b)$$

Donde $\Gamma(.)$ es la función Gamma. La primera parte es la contribución de la distribución Gaussiana y la segunda parte (J_n) es la contribución de la distribución Weibull. Todas estas fórmulas son dependientes de los parámetros A, B y C, y para poder calcular la probabilidad de distribución y los momentos de los rangos de esfuerzos x, dichos parámetros deben ser determinados.

2.8.1 Parámetros de la Distribución Probabilística

Para procesos de esfuerzos o tensiones generales, la distribución probabilística de los rangos de esfuerzos ha sido definida por la distribución Gaussiana y por la distribución Weibull, en términos de unos parámetros constantes presentada en la sección anterior. La distribución Gaussiana depende solo del parámetro A, y la distribución Weibull depende de los parámetros B y C como se muestra claramente en la ecuación (2.21b).

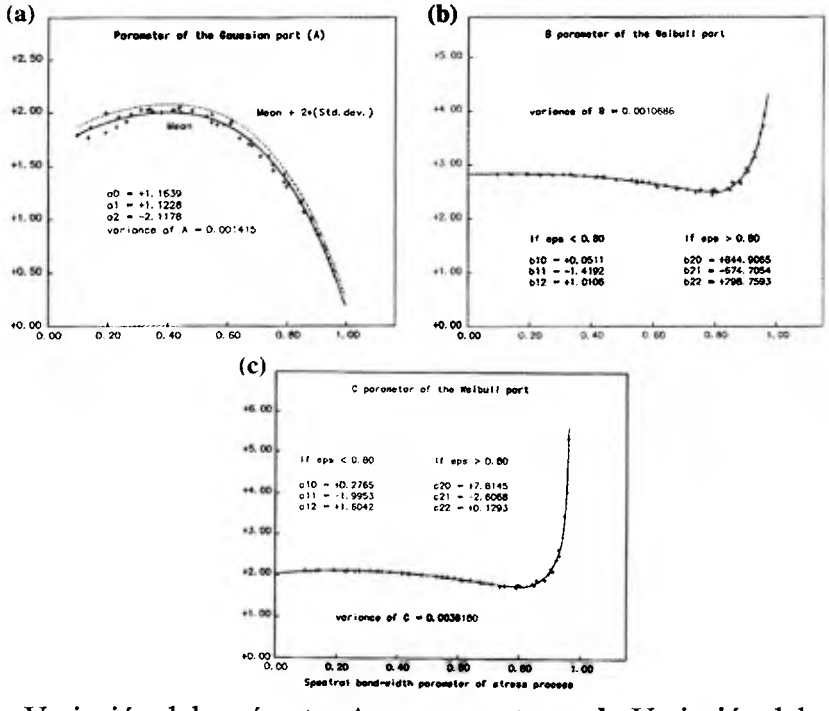


Figura 2.16: **a.** Variación del parámetro A con respecto a ε, **b.** Variación del parámetro B con respecto a ε, **c.** Variación del parámetro C con respecto a ε.
Fuente: Stochastic Analysis of Offshore Steel Structures. Halil Karadeniz.

Para procesos de esfuerzos de banda estrecha, la parte de Gaussiana de la distribución desaparece y la parte Weibull se convierte es una distribución Rayleigh con parámetros B y C iguales a:

$$\text{Proceso de esfuerzos de banda estrecha } (\varepsilon = 0) \rightarrow \begin{cases} B = 2\sqrt{2} \\ C = 2 \end{cases} \tag{2.24}$$

Para procesos generales, es decir para cualquier otro valor de ε que vaya entre *0* y *1*, los valores de los parámetros A, B y C han sido determinados experimentalmente y sus variaciones con respecto a ε se encuentran tabuladas en las gráficas de las Figura 2.16.

2.9 Análisis Espectral de la Fatiga Basados en Curvas S–N de Múltiples Segmentos

En las secciones previas se han presentado todos los componentes claves para el cálculo de los daños causados por la fatiga, los cuales son:

- Modelo de curva S–N representado con la ecuación (2.14)
- Modelo de daño acumulativo representado por la ecuación (2.18)
- La función de densidad de probabilidades (PDF) para un rango de esfuerzos estocásticos dado por las ecuaciones (2.21a) y (2.21b)

En el caso de un historial de esfuerzos aleatorios, el daño causado por un ciclo de esfuerzo se puede obtener a partir de la ecuación (2.18) y viene dado por.

$$\mathrm{d}D = \frac{1}{N} \rightarrow N = C{S_h}^{-k} \tag{2.25a}$$

Para una curva S–N de múltiples segmentos, introduciendo las ecuaciones (2.15) y (2.16) dentro de la ecuación (2.25a) el daño para un ciclo de esfuerzo para un segmento cualquiera *j* puede ser escrito como.

$$\mathrm{d}D_j = \frac{1}{C_j}(SCF \times S)^{k_j} \rightarrow \left(S_j \leq S \leq S_{j+1}\right) \tag{2.25b}$$

De otro modo, usando el rango de esfuerzos normalizado x de la ecuación (2.19a), la ecuación anterior se puede escribir como.

$$\mathrm{d}D_j = \frac{1}{C_j}(SCF \times \sigma_S)^{k_j} x^{k_j} \rightarrow \begin{cases} x_j \leq x \leq x_{j+1} \\ x = S/\sigma_S \end{cases} \tag{2.25c}$$

Donde σ_S es la desviación estándar del proceso de esfuerzos nominal. El valor medio de $\mathrm{d}D_j$ es calculado usando la función de densidad de probabilidades (PDF) y se establece como.

$$E\left[\mathrm{d}D_j\right] = \frac{1}{C_j}(SCF \times \sigma_S)^{k_j} \int_0^\infty x^{k_j} f_s(x)\mathrm{d}x = \frac{1}{C_j}(SCF \times \sigma_S)^{k_j} M_{kj} \tag{2.26}$$

Donde M_{kj} es el factor espectral del ancho de banda del proceso de esfuerzos el cual es calculado de forma similar a como lo establece la forma de la ecuación (2.23b).

$$M_{kj} = \frac{\varepsilon^2}{\sqrt{\pi}}\left(\sqrt{2}\varepsilon A\right)^{k_j}\Gamma\left(\frac{1+k_j}{2}\right) + \alpha B^{k_j}\int_0^\infty x^{k_j/c}\,\mathrm{erf}\left(\frac{\alpha}{\varepsilon}\sqrt{x}\right)e^{-x}\mathrm{d}x \tag{2.27a}$$

$$\alpha = \sqrt{1-\varepsilon^2}$$

Para los valores extremos, ($\varepsilon = 0$) y ($\varepsilon = 1$), es decir, para procesos de bandas estrechas o de bandas anchas, el factor M_{kj} se puede escribir como.

$$M_{kj} = \left(\sqrt{2}\right)^{k_j}\Gamma\left(1+\frac{k_j}{2}\right) \rightarrow \text{Banda estrecha (Rayleigh)}$$

$$M_{kj} = \frac{(0.23886)^{k_j}}{\sqrt{\pi}}\Gamma\left(\frac{k_j+1}{2}\right) \rightarrow \text{Banda ancha (Gaussiano)} \tag{2.27b}$$

El daño total medio de un ciclo, $E[\mathrm{d}D]$, para la curva S–N completa es calculado de la sumatoria probabilística del daño medio de todos los segmentos de la curva, y se expresa como.

$$E[\mathrm{d}D] = \sum_{j=1}^{NL} P_j(S)E[\mathrm{d}D_j] \tag{2.28}$$

Donde NL denota el número de segmento totales de la curva S–N, como se muestra en la Figura 2.12, $P_j(S)$ es la probabilidad que el rango de esfuerzo S caiga dentro de la región del segmento j y $E[\mathrm{d}D_j]$ es calculado como lo muestra la ecuación (2.26).

Teniendo calculado el daño por fatiga de un ciclo $E[\mathrm{d}D]$, el daño por fatiga que ocurre para un estado del mar H_s, es calculado multiplicando $E[\mathrm{d}D]$ por el número de ciclos que ocurren durante ese estado del mar. Esto se puede escribir como.

$$D_{Hs} = n_{sHs}E[\mathrm{d}D] = (T_{Hs}/T_m)E[\mathrm{d}D] \tag{2.29a}$$

Donde n_{sHs} es el número de ciclos en el estado del mar H_s, T_{Hs} es el periodo de estado del mar y T_m es el periodo medio del máximo esfuerzo en el estado del mar. El daño acumulativo para todos los estados del mar idénticos (con el mismo periodo T_{Hs}) es calculado como.

$$(D_{tot})_i = (N_{Hs})_i D_{Hs} = (N_{Hs})_i (T_{Hs}/T_m)E[\mathrm{d}D] \tag{2.29b}$$

Donde $(N_{Hs})_i$ es el número total de los estados del mar con el mismo periodo T_{Hs}. Para un tiempo de vida T, el daño total es obtenido por la sumatoria de la acumulación de daños de todos los estados de mar idénticos, y se escribe como.

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{HS}} (D_{tot})_i = \sum_{i=1}^{N_{HS}} (N_{HS})_i (T_{Hs}/T_m)E[\mathrm{d}D] \tag{2.29c}$$

Donde N_{HS} es el número total de diferentes estados del mar idénticos para un periodo de vida T. Si multiplicamos y dividimos la ecuación (2.29c) por el número total de estados del mar que se tienen para el tiempo de vida T, el daño acumulativo, D_{tot}, se puede volver a escribir como.

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{HS}} \frac{(N_{HS})_i}{N} N \frac{T_{Hs}}{T_m} E[\mathrm{d}D] = \sum_{i=1}^{N_{HS}} P_i(H_s) N \frac{T_{Hs}}{T_m} E[\mathrm{d}D] \qquad (2.29\mathrm{d})$$

Donde N es el número total de estados del mar que se tienen para el tiempo de vida T y $P_i(H_s)$ es la probabilidad que el estado del mar ocurra en el tiempo de vida T. Colocando el estado N en función de los periodos T y T_{Hs} el daño total finalmente será.

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{HS}} P_i(H_s) \frac{T}{T_{Hs}} \frac{T_{Hs}}{T_m} E[\mathrm{d}D] = T \sum_{i=1}^{N_{HS}} P_i(H_s) \frac{1}{T_m} E[\mathrm{d}D] \qquad (2.30\mathrm{a})$$

La ecuación (2.30a) muestra los daños totales por fatiga cuando los estados del mar son pausados, es decir, diagramas de dispersión son usados para la distribución probabilística de los estados a largo plazo. También se puede interpretar como la probabilidad de daño acumulado para todos los estados del mar estudiados en el tiempo de vida T. la relación (T / T_m), es el número total de ciclos en el tiempo de vida, y el daño total de un estado del mar para T, el cual se denota como $(D_{tot})_{Hs}$ puede ser expresada como.

$$(D_{tot})_{Hs} = \frac{T}{T_m} E[\mathrm{d}D] \qquad (2.30\mathrm{b})$$

Cuando es multiplicado por la probabilidad de que el estado del mar ocurra en T, es decir, $P_i(H_s)$, se obtiene la contribución del daño total. Entonces, el daño total puede ser expresado como la sumatoria de la contribución de todos los estados del mar, escrito como.

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^{N_{HS}} (D_{tot})_{Hs} P_i(H_s) \tag{2.30c}$$

La ecuación (2.30c) representa lo mismo que lo que establece la ecuación (2.30a). Sin embargo, si se usa un estado de mar continuo en vez de uno pausado, entonces el daño total a largo plazo es calculado como el valor medio de $(D_{tot})_{Hs}$ dado en el ecuación (2.30b).

$$D_{tot} = T \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{T_m} E[\mathrm{d}D] f_{Hs,Tz}(h,t) \mathrm{d}h\mathrm{d}t \tag{2.31}$$

Donde $f_{Hs,Tz}(h,t)$ en la distribución de la función de densidad de probabilidades de la altura significativa de la ola, H_S y del periodo de la misma, T_Z.

2.10 Factor de Concentración de Esfuerzos (SCF)

Como sabemos, los daños causados por fatiga son altamente dependientes de las tensiones cíclicas provenientes principalmente del oleaje marino, las cuales deben ser consideradas a la hora de utilizar la curva S–N. Para el estudio de los daños por fatiga en las estructuras marinas, es muy importante tomar en cuenta el enfoque del factor de concentración de esfuerzos en las juntas (Strees Concentration Factor). Para el caso de juntas tubulares este factor no tiene referencia en la curva S–N, es por eso que se debe considerar los esfuerzos en cuatro puntos adyacentes a la junta, asimismo, la fatiga es denominada de los esfuerzos perpendiculares a la soldadura.

La concentración de esfuerzos describe las condiciones a las cuales los esfuerzos locales son producidos como consecuencia de la geometría de la junta, y los daños por fatiga ocurren a niveles normales de esfuerzos, siempre y cuando sean altas en las zonas locales. Es interesante notar que el diseño viene dado por la acción conjunta de la concentración de esfuerzos y por la fatiga sobre las juntas.

Como se puede ver en la Figura 2.10, en las juntas tubulares los *hotspots* se localizan en las zonas donde se concentran las máximas tensiones, y dichas tensiones vienen dadas por la multiplicación del esfuerzo nominal por el factor de concentración de esfuerzos (SCF), como lo establece la ecuación (2.16). Varias investigaciones se han llevado a cabo en las últimas décadas para conocer cuál es la mejor forma de determinar el SCF en juntas tubulares, estableciendo diferentes ecuaciones, las cuales cada norma se ha encargado de adoptar la más conveniente para ellos.

Las ecuaciones más usadas por las normas para determinar el SCF cuando se está diseñando por fatiga son las ecuaciones de Efthymiou, establecidas en 1988, para las cuales según Tang (2010) se usó el método de elementos finitos para determinar el SCF en juntas tubulares. Estas ecuaciones son usadas por las normas API. Las ecuaciones de Efthymiou son las siguientes.

$$SCF = 1.45\beta\tau^{0.85}\gamma^{(1-0.68\beta)}\text{sen}^{0.7}\theta \qquad \text{Para el } Chord \tag{2.32a}$$

$$SCF = 1 + 0.65\beta\tau^{0.4}\gamma^{(1.09-0.77\beta)}\text{sen}^{(0.06\gamma-1.16)}\theta \qquad \text{Para el } Brace \tag{2.32b}$$

Donde β, τ, γ y θ son parámetros que dependen de la geometría de la conexión. La norma API establece que estas ecuaciones son válidas si sus parámetros se encuentran dentro de los siguientes límites.

- $0.2 \leq \beta \leq 1.0$
- $8 \leq \gamma \leq 32$
- $0.2 \leq \tau \leq 1.0$
- $20° \leq \theta \leq 90°$

En caso de que uno o más parámetros se encuentren fuera de estos rangos, se evalúa el SCF con el valor real, luego con el valor límite y se escoge el resultado mayor

Las plataformas costa afuera son diseñadas, estadísticamente, para un periodo de vida mínimo de 20 años, si no se conoce o no se ha establecido la vida útil de la estructura, para este tiempo los ciclos de esfuerzos serán de alrededor $1x10^8$. Hay que resaltar que estos son datos que se asumen como generales provenientes de estadísticas.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

Para el desarrollo de este trabajo especial de grado, se plantea realizar un modelo de una estructura fija costa afuera tipo jacket con la finalidad de conocer el daño que ocasiona el oleaje marino sobre la misma a través de un análisis de fatiga, asistido por el programa SACS usando la versión 5.3.

En esta sección se muestran los procedimientos que son llevados a cabo para la realización del mismo y así lograr los objetivos anteriormente planteados.

3.1 Tipo de Investigación

De acuerdo con Plazas (2011)

> La investigación Documental es una variación de la Investigación Científica, cuyo objeto es analizar los diferentes fenómenos que se presentan en la realidad utilizando como recurso principal los diferentes tipos de documentos que produce la sociedad y a los cual tiene acceso el investigador.

Según la definición anterior, se puede decir que el presente trabajo especial de grado corresponde a una investigación del tipo documental, debido a que se estudia el fenómeno de fatiga sobre una estructura fija costa afuera a partir de una recopilación de datos ya establecidos por múltiples fuentes.

3.2 Niveles de exploración.

Según Gross (2010), la investigación exploratoria es "Aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultado constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimiento"

El presente trabajo especial de grado pretende dar a conocer el procedimiento correcto para realizar un análisis de fatiga a través de programa SACS, logrando así los objetivos planteados.

3.2.1 Recolección de datos para la elaboración de la investigación.

Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener información. Sabino (1997) expresa, "Un instrumento de recolección de datos es, en principio, cualquier recurso del que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información" (p. 108)

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, los datos necesarios para el modelaje de la plataforma marina y de las cargas ambientales, se obtienen de una práctica en el uso del programa SACS, suministrada por el especialista Dr. Mohamed A. El-Reedy y contactado a través del profesor guía.

3.2.2 Consulta de Normas Internacionales

Dentro del proceso de la elaboración de esta investigación, se interpretaron los métodos de cálculo y gráficos de la norma API RECOMMENDED PRACTICE FOR PLANNING, DESIGNING AND CONSTRUCTING FIXED OFFSHORE PLATFORMS-WORKING STRESS DESING 2A-WSD (RP 2A-WSD), destinada al análisis, diseño y construcción de Plataformas Fijas costa afuera.

3.2.3 Modelaje de la estructura fija costa fuera tipo Jacket.

A partir de la evaluación exploratoria de los datos estadísticos del oleaje, se evalúan ingresando al programa SACS donde se aplican a la estructura tipo Jackect de cuatro patas a distintas profundidades con el fin de evaluar los daños ocasionados por las reacciones cíclicas provenientes del oleaje marino.

3.2.4 Dificultades durante el modelaje de la estructura fija costa afuera tipo Jacket

Durante la investigación se generaron ciertas dificultades con respecto al modelaje y análisis de la estructura con el programa SACS, ya que se desconoce el uso correcto de este software. Dicho programa, a pesar de ser comercializado a nivel mundial por la empresa Americana Bentley, no es de fácil acceso para su uso en Venezuela.

Asimismo, para el correcto manejo de SACS, se requirió de una consulta en línea en tiempo real con un especialista, anteriormente nombrado, en el manejo del software residenciado en Egipto generando gastos adicionales en una moneda diferente a la local.

Adicionalmente, fué necesaria la búsqueda de manuales y videos a través de internet, para el uso adecuado del software utilizado, a fin de realizar de manera satisfactoria el análisis de fatiga a partir de fuerzas generadas por el oleaje marino sobre la estructura fija costa afuera.

CAPÍTULO IV
APLICACIÓN AL CASO REAL

En el presente capítulo se detalla el procedimiento para realizar el análisis espectral de fatiga por medio del programa SACS en la versión 5.3.

4.1 Descripción del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto consiste en realizar un análisis de fatiga a una estructura fija costa afuera tipo jacket a través del software especializado SACS. Para ello, todos los datos necesarios fueron tomados de un ejemplo usado como entrenamiento para el uso del programa SACS, estos corresponden a los datos estructurales y ambientales, es importante aclarar que el ejemplo establece que los cargas ambientales se deben aplicar en 3 direcciones, 0°; 45° y 90°, en un caso real, las cargas ambientales deben aplicarse en todas las direcciones posibles cada 45°. Asimismo, se toma en cuenta que el análisis se rige bajo los parámetros establecidos en la norma API, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A – WSD).

4.2 Modelo Estructural

La estructura analizada es una plataforma fija tipo jacket hecha con miembros tubulares de acero y cuenta con las siguientes características:

- Numero de piernas: 4
- Inclinación de piernas: 1:10 (sólo aplica para las piernas 2 y 4)
- Altura del jacket: 85 m
- Altura de la estructura: 105 m
- Profundidad de agua: 79.5 m
- Elevación del working point (W.P.): +4 msnm
- Elevación de conexión pilote–jacket : +3 msnm

- Elevaciones de arriostramientos horizontales: +2 msnm
  -21 msnm
  -50 msnm
- Elevación de la cubierta principal: +23 msnm
- Elevación de la cubierta secundaria: +15.3 msnm
- Distancia entre W.P. en dirección X: 15 m
- Distancia entre W.P. en dirección Y: 10 m

Propiedades del material:

- Módulo de elasticidad (E): 20000 kN/cm^2
- Módulo de rigidez trasversal (G): 7724 kN/cm^2
- Esfuerzo de fluencia (Fy): 24.8 kN/cm^2
- Densidad: 7.849 ton/m^3

4.2.1 Modelado de la estructura en SACS versión 5.3

Al abrir la interfaz principal del programa SACS, se procede a seleccionar **"Modeler"** disponible en el menú **"Interactive"**, a continuación se muestra un cuadro de dialogo con el título **"PRECEDE"** la cual presenta tres opciones, donde se selecciona **"Create new model"**, y se presiona **OK.**

Seguidamente se observa una nueva pantalla precedida de un cuadro de dialogo con el título **"New Model Options"**, donde se indica las opciones de inicio, **"Start Options"**, y las opciones de unidades, **"Units"**. Dentro de las opciones de inicio se selecciona **"Start Structure Definition Wizars"** y para las opciones de unidades, por conveniencia, se va a trabajar con la opción **"Metric with kN forcé"**.

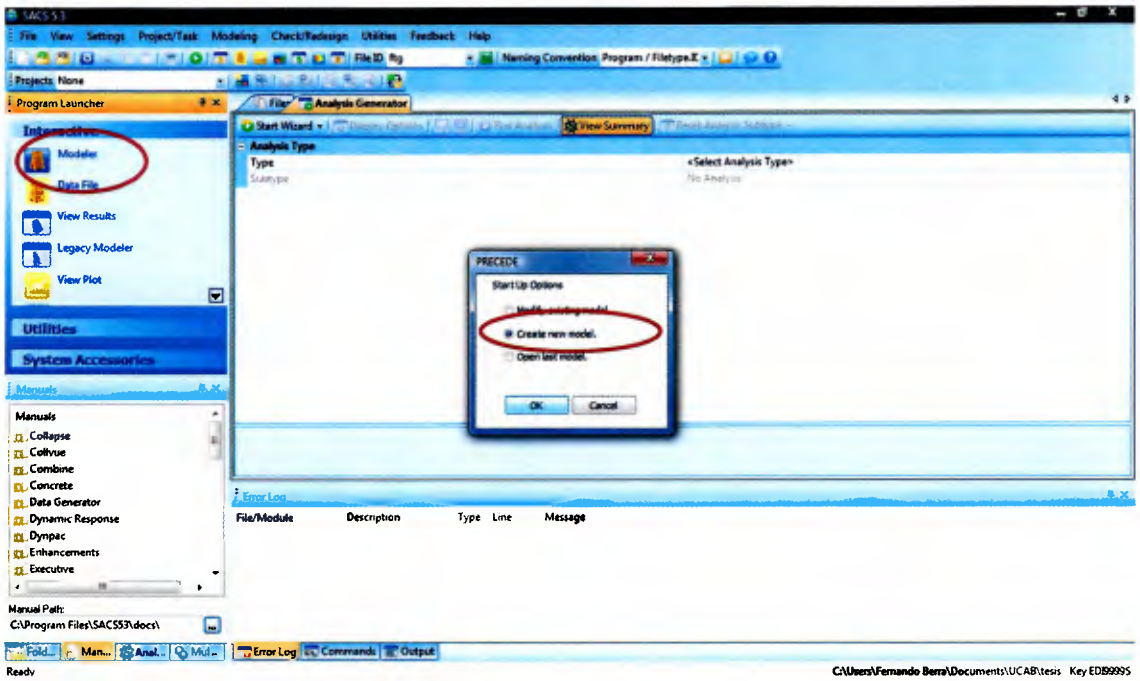


Figura 4.1: Creación de nuevo archivo de modelaje
Fuente: SACS ver. 5.3

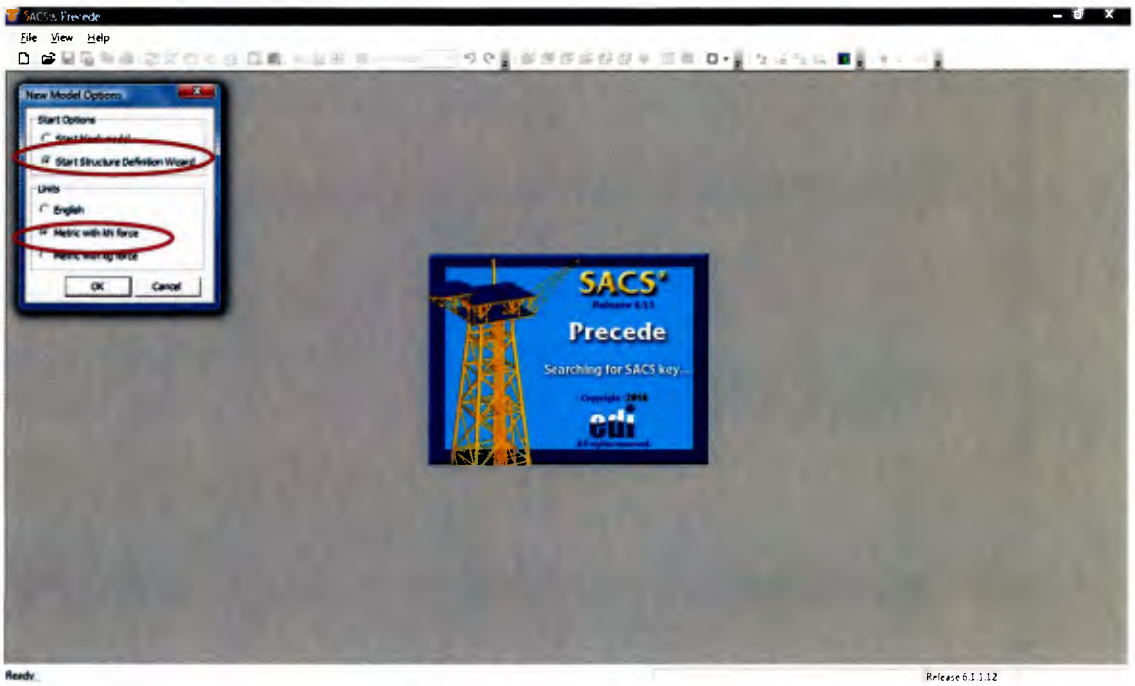


Figura 4.2: Opciones de modelo
Fuente: SACS ver. 5.3

Después de seleccionar las opciones de inicio y de unidades, se muestra un nuevo cuadro de dialogo con el título **"Structure Definition"**. Dentro de este cuadro, en la pestaña de **"Elevations"**, se colocan los datos referentes a todas las elevaciones de la estructura según los datos mostrados anteriormente y de acuerdo al dibujo guía que el cuadro nos proporciona.

Posteriormente dentro de la pestaña de **"Legs"**, se introducen los datos relacionados a las piernas, indicadas en la sección anterior, y nuevamente se nos suministra un dibujo guía. Las figuras 4.3 y 4.4 muestra dicho cuadro de dialogo con los datos introducidos.

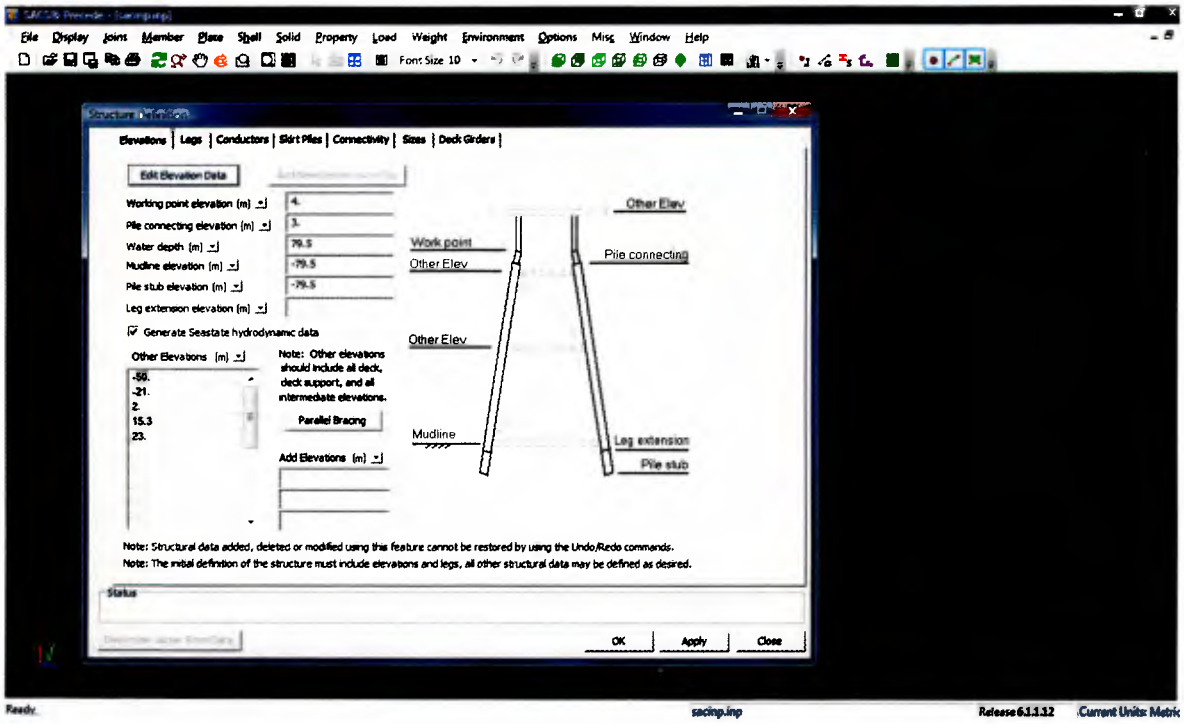


Figura 4.3: Cuadro de dialogo para definir elevaciones
Fuente: SACS ver. 5.3

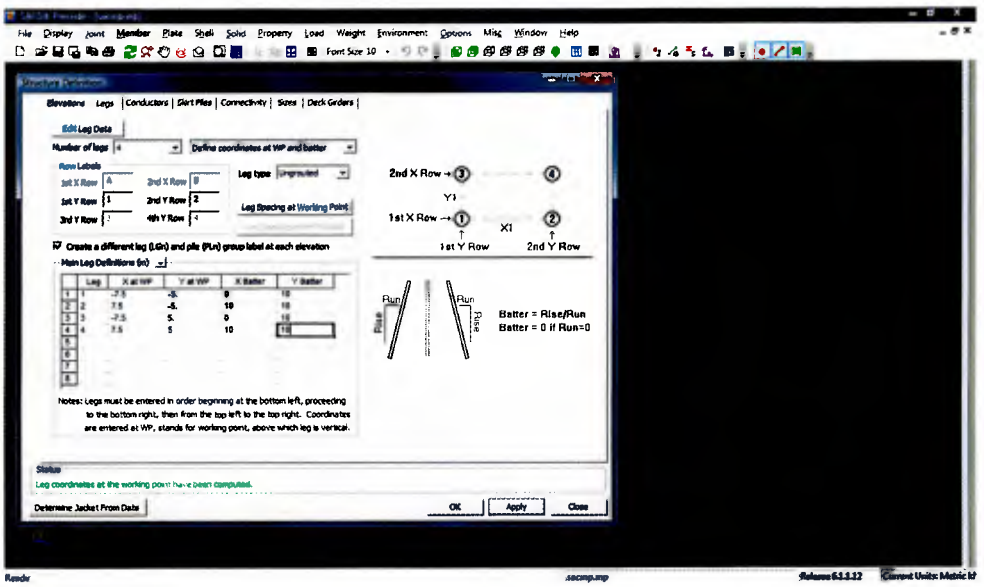


Figura 4.4: Cuadro de dialogo para definir las piernas de la estructura
Fuente: SACS ver. 5.3

Al introducir los datos iniciales y presionar **OK**, aparece el boceto preliminar de la estructura, compuesto por los miembros de las piernas, los pilotes (que van por dentro de las piernas) y de las columnas principales del topside, como se muestra en la figura 4.5.

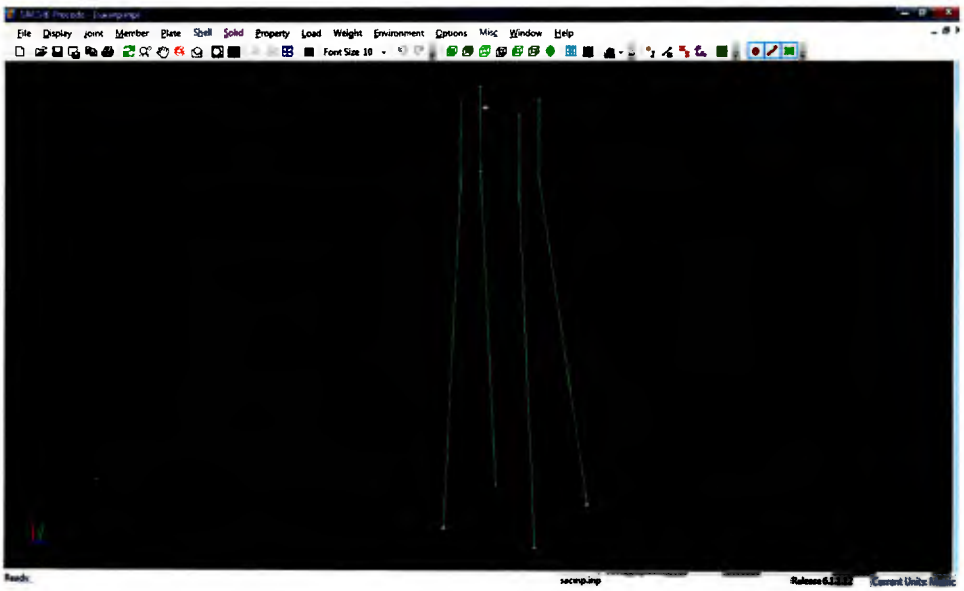


Figura 4.5: Boceto preliminar de la estructura tipo jacket
Fuente: SACS ver. 5.3

Para colocar los arriostramientos horizontales en cada nivel, primero se abre el menú **"Display"** y se selecciona la opción de **"Plan..."** para abrir un cuadro de dialogo con el título **"Display Plan"**, elegimos la vista en planta de **-79.5**, esto es para trabajar con la vista en planta a esa cota.

Con la vista en planta, se procede a abrir el menú **"Member"** y se selecciona la opción de **"Add..."** para abrir un cuadro de dialogo con el título **"Add Member"**, se selecciona las juntas que se van a unir con un miembro, se coloca el nombre del grupo al que dicho miembro pertenecerá en la casilla **"Group label"** y se presiona **"Apply"**. Esto se repite para agregar cada uno de los miembros. Es muy importante tener orden a la hora de asignar los nombres a los grupos.

Posteriormente, se dividen los miembros colocando nuevas juntas, esto se hace abriendo el menú **"Member"**, **"Divide"**, se selecciona la opción **"Distance from joint A"**. Dentro del nuevo cuadro de dialogo se selecciona el miembro que se desea dividir, se coloca la distancia a la que se agrega la nueva junta y se escribe el nombre de la junta agregada. Finalmente se agregan todos los miembros que faltan. Aquí también es importante tener orden al asignar los nombres a las nuevas juntas. En las figuras 4.6; 4.7 y 4.8 se muestran la secuencia.

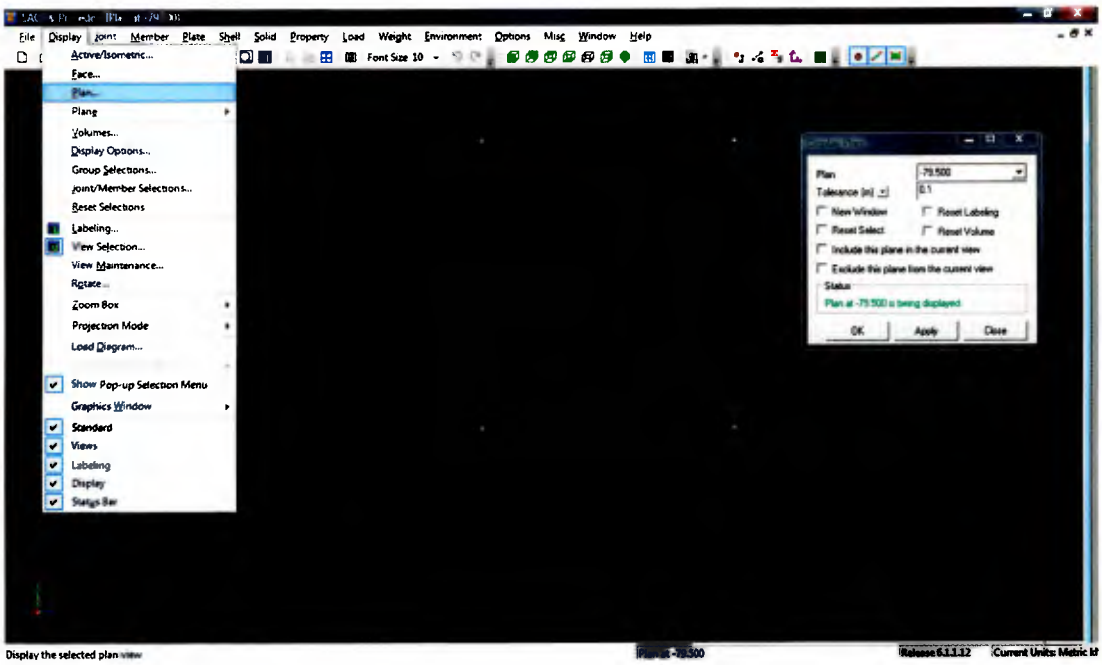


Figura 4.6: Vista en plata cota -79.5
Fuente: SACS ver. 5.3

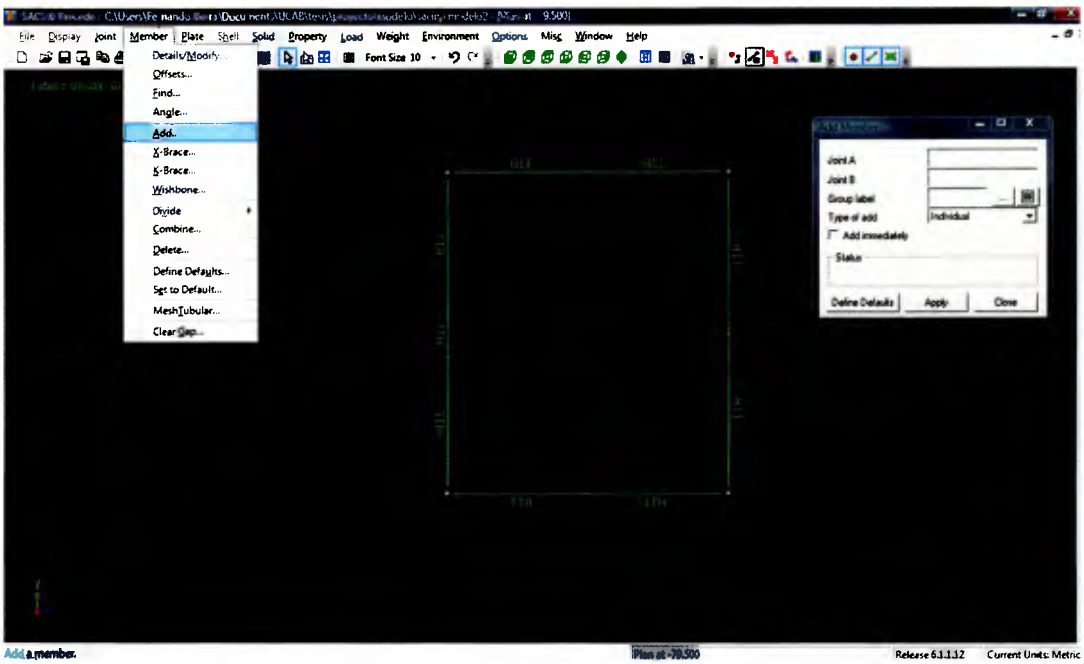


Figura 4.7: Vista en planta cota -79.5 con miembros horizontales
Fuente: SACS ver. 5.3

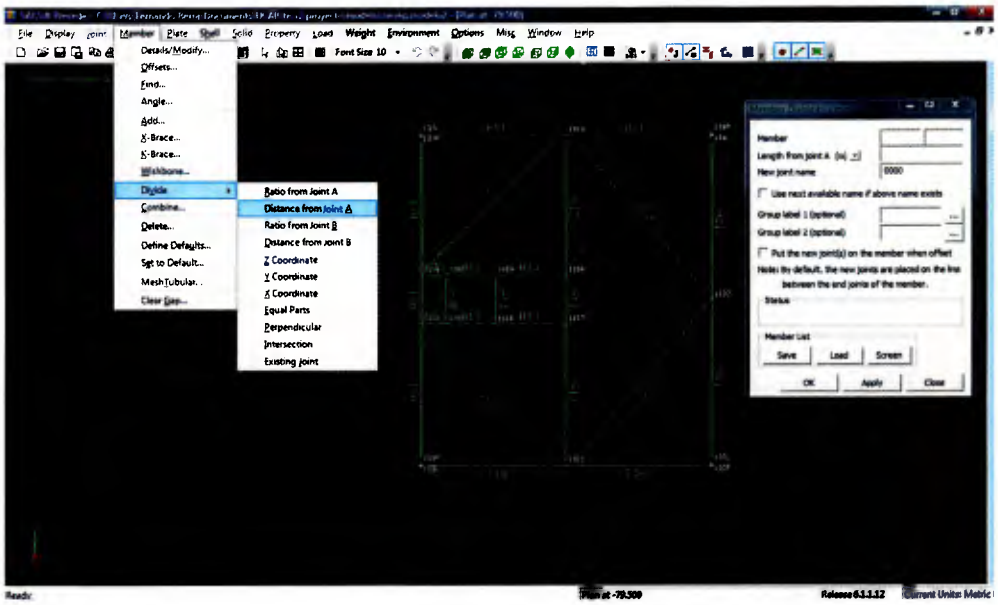


Figura 4.8: Vista en planta cota -79.5 con arriostramientos horizontales
Fuente: SACS ver. 5.3

Este procedimiento, de agregar miembros, se repite para las elevaciones -50; -21; +2 y se tiene la estructura como se muestra en la figura 4.9.

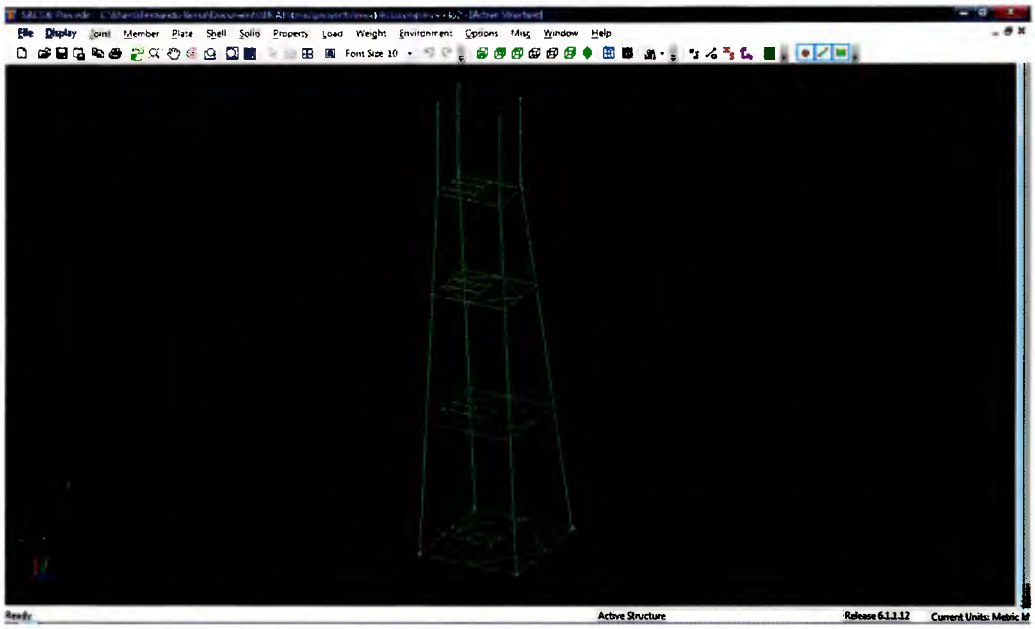


Figura 4.9: Vista isométrica de la estructura con todos los arriostramientos horizontales
Fuente: SACS ver. 5.3

Para colocar los arriostramientos laterales en forma de X, dentro del menú **"Display"** se selecciona la opción **"Face..."** y elegimos la vista lateral **ROW A**. Seguidamente, dentro del menú de **"Member"** se selecciona la opción **"X-Brace..."**, se escoge las cuatro juntas que van a conformar el arriostramiento en X y se le da nombre al grupo al que van a pertenecer, como se muestra en la figura 4.11.

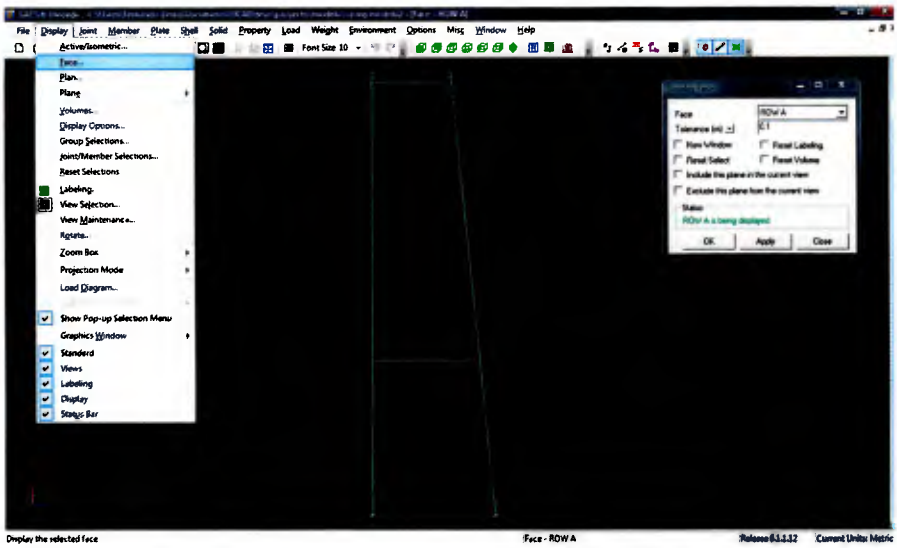


Figura 4.10: Vista lateral de la fila A
Fuente: SACS ver. 5.3

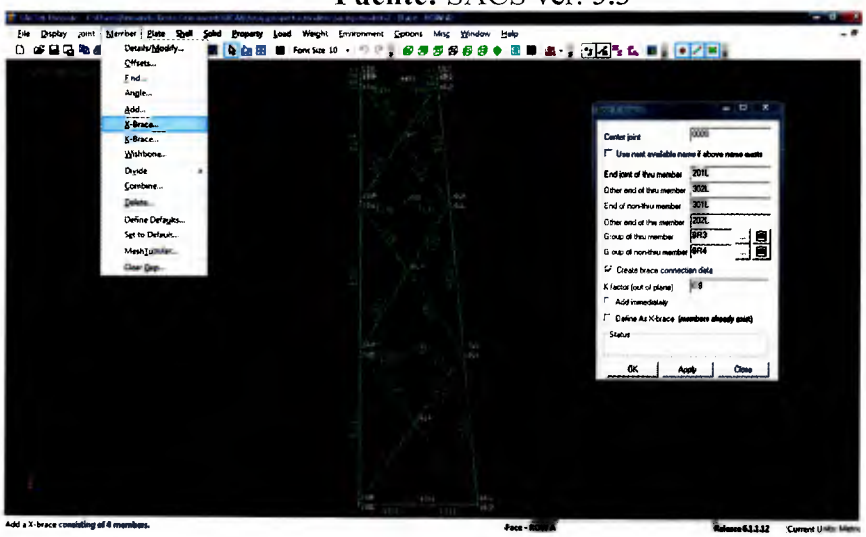


Figura 4.11: Vista lateral de la fila A con arriostramientos en forma de X
Fuente: SACS ver. 5.3

Este procedimiento se repite para agregar todos los arriostramientos en forma de X en la fila B, fila 1 y fila 2. Para agregar los miembros de los de las cubiertas principal y secundaria, ubicadas a +23m y a +15.3m respectivamente sobre el nivel del mar, se siguen los mismos pasos explicados para añadir los arriostramientos horizontales. Se coloca la vista en planta de la elevación que se desea trabajar y se agregan las juntas y miembros que conforman las cubiertas. De este modo tenemos la estructura con todos los miembros asignados como se muestra en la figura 4.12.

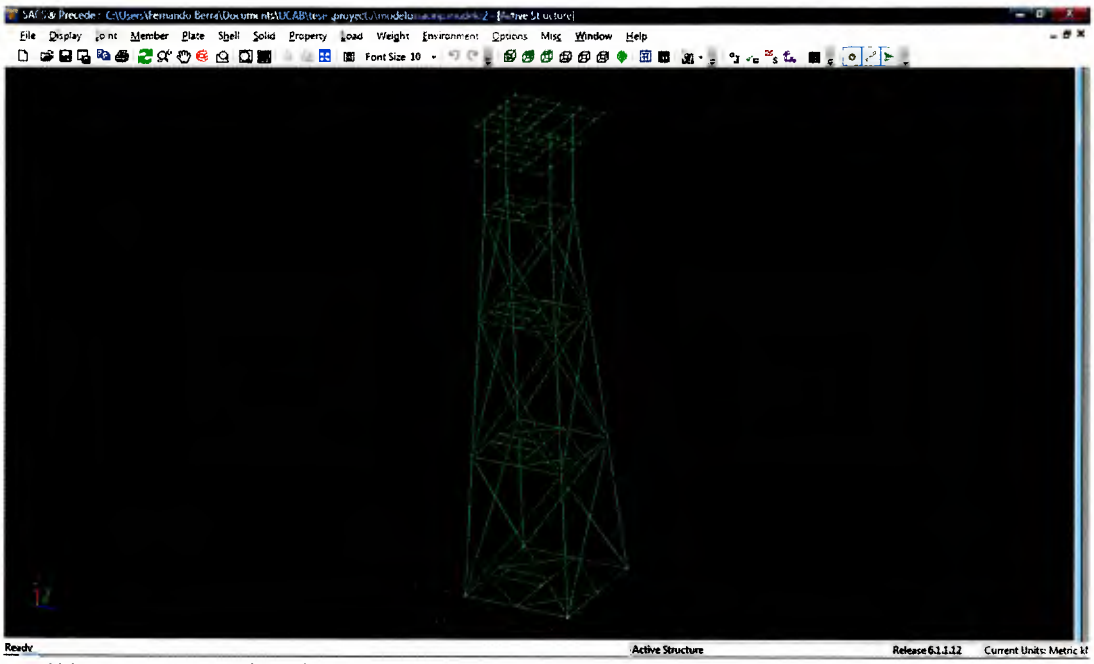


Figura 4.12: Vista isométrica de la estructura con todos los arriostramientos.
Fuente: SACS ver. 5.3

Ahora es necesario agregar pisos a las cubiertas, de esta forma se le proporciona más rigidez a la estructura; esto es muy importante para el análisis de fatiga del proyecto. Para ello se ubica la vista en planta de la cubierta con la que se desea trabajar, como se ha indicado anteriormente, se abre el menú **"Plate"** y se elige la opción **"Add…"**, de esta forma aparece una ventana donde se seleccionan cuatro juntas que van a conformar la sección del piso de la

cubierta, y por último se asigna un nombre al grupo. Esto hay que hacerlo por secciones para que todas las juntas sean seleccionadas, como se muestra en la figura 4.13.

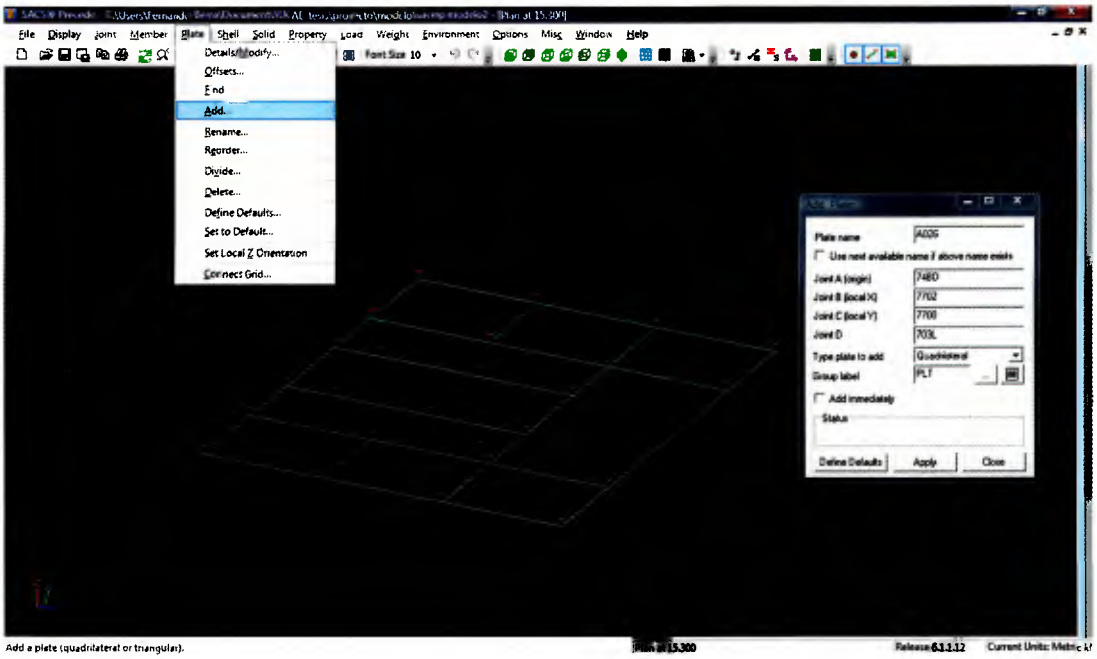


Figura 4.13: Asignación del suelo de la cubierta secundaria.
Fuente: SACS ver. 5.3

Una vez el modelado de la estructura esté finalizado, se les debe asignar las propiedades a todos los miembros de la misma. Cada miembro debe estar asignado a un grupo, y el programa permite asignarle las propiedades a cada grupo por separado, de esta forma, todos los miembros que estén dentro de un mismo grupo tendrán las mismas propiedades. Para asignar las propiedades a los grupos se siguen los siguientes pasos:

1. Se abre el menú **"Property"** y se selecciona la opción **"Menber Group…"**.
2. Se abre un cuadro de dialogo con el título **"Member Group Manager"**, donde se debe seleccionar, del recuadro izquierdo titulado **"Undefined Group"**, el grupo al que se le desea asignar una propiedad especifica, y hacer click en el botón **"Add"**.
3. Dentro del nuevo cuadro de dialogo con el título **"Edit Member Group"**, se le asignan las propiedades al grupo seleccionado. Las propiedades más importantes son:

el tipo del grupo (si el miembro es tubular o posee otra forma), diámetro externo, espesor de pared y las propiedades del material, las cuales se mencionaron al principio del capítulo.

En la figura 4.14 se muestra la asignación de las propiedades al grupo correspondiente a los arriostramientos laterales.

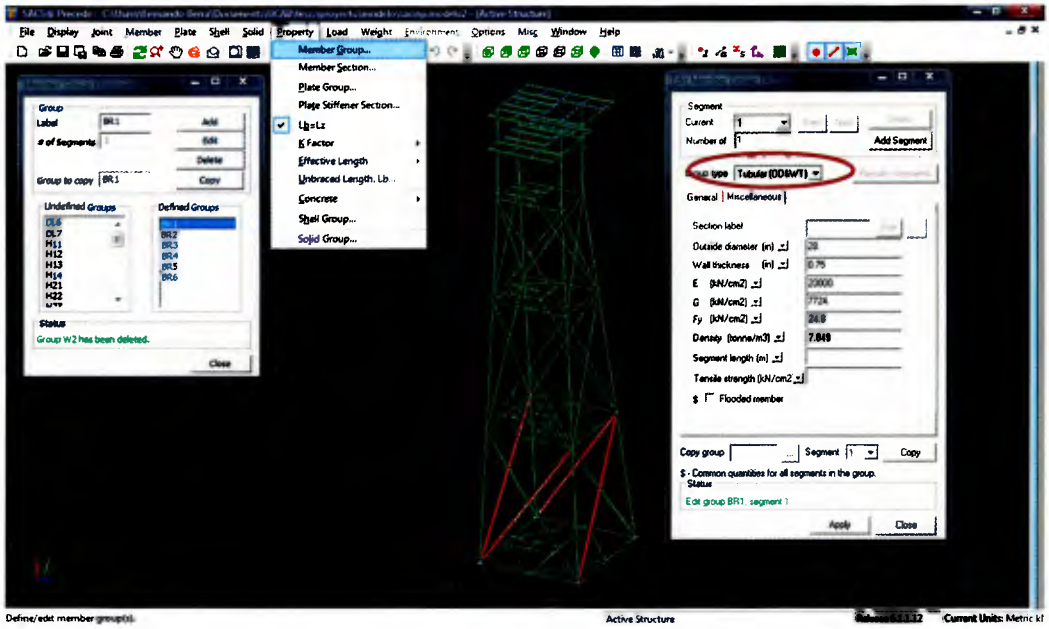


Figura 4.14: Asignación de propiedades al grupo BR1
Fuente: SACS ver. 5.3

Para asignarle propiedades al piso de la cubiertas, igualmente dentro del menú **"Property"** se selecciona la opción **"Plate Group..."**, dentro de la ventana de dialogo que aparece se selecciona el grupo con el que se desea trabajar y se le asignan las propiedades correspondientes.

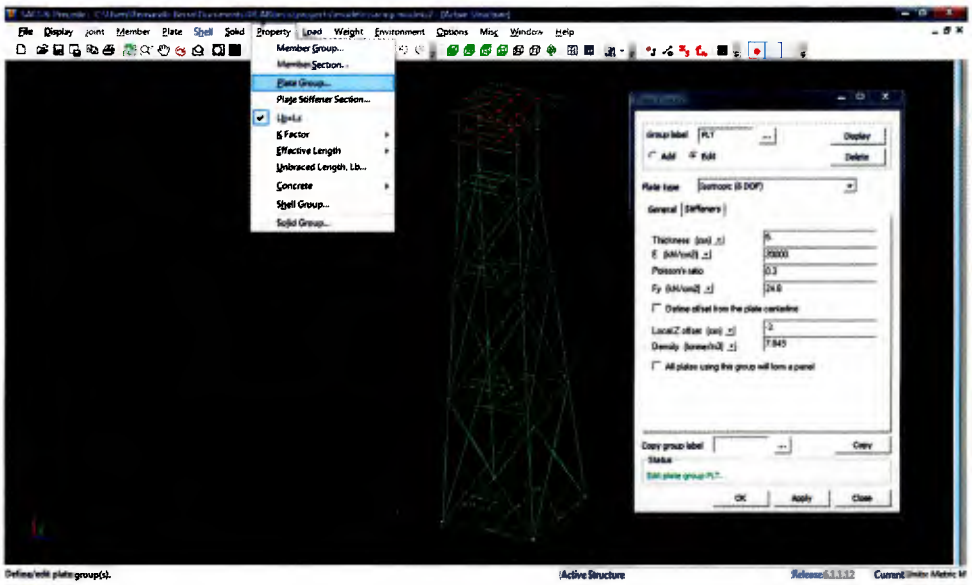


Figura 4.15: Asignación de las propiedades del piso de las cubiertas
Fuente: SACS ver. 5.3

Finalmente, terminado el modelado y asignada todas las propiedades a todos los miembros de la estructura, se puede realizar una visualización de los elementos sólidos haciendo click en **"Toggle Wireframe / Solid Element on Active Window"**.

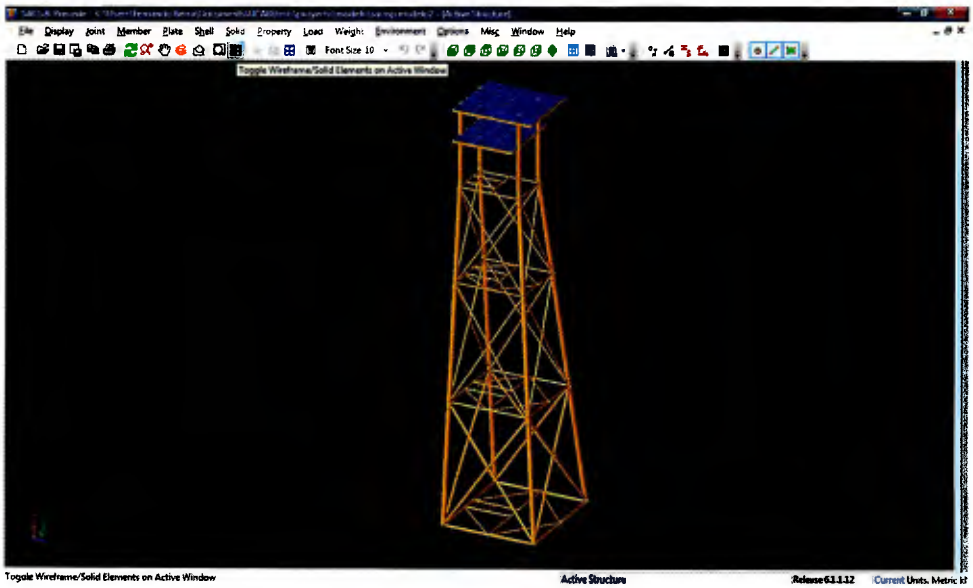


Figura 4.16: Vista isométrica de la estructura finalizada.
Fuente: SACS ver. 5.3

Una peculiaridad del programa SACS, en todas sus versiones, es que para guardar los archivos se debe colocar primero la extensión y luego el nombre del archivo. De este modo, para guardar el modelo correctamente se debe abrir el menú **"File"**, seleccionar la opción **"Save As..."**, en el cuadro de dialogo que aparece a continuación, seleccionar la opción de **"model data only"**, esto es para que guarde únicamente los datos de la estructura, y dejar las demás opciones igual. Al presionar **OK**, aparece la ventana de dialogo para guardar el archivo y en el recuadro de nombre del archivo se debe poner la extensión **"sacinp."**, seguido del nombre que se le desea poner al archivo. Es recomendable tener una carpeta únicamente para el modelo de la estructura. Las figuras 4.17 y 4.18 muestran las secuencias de guardado.

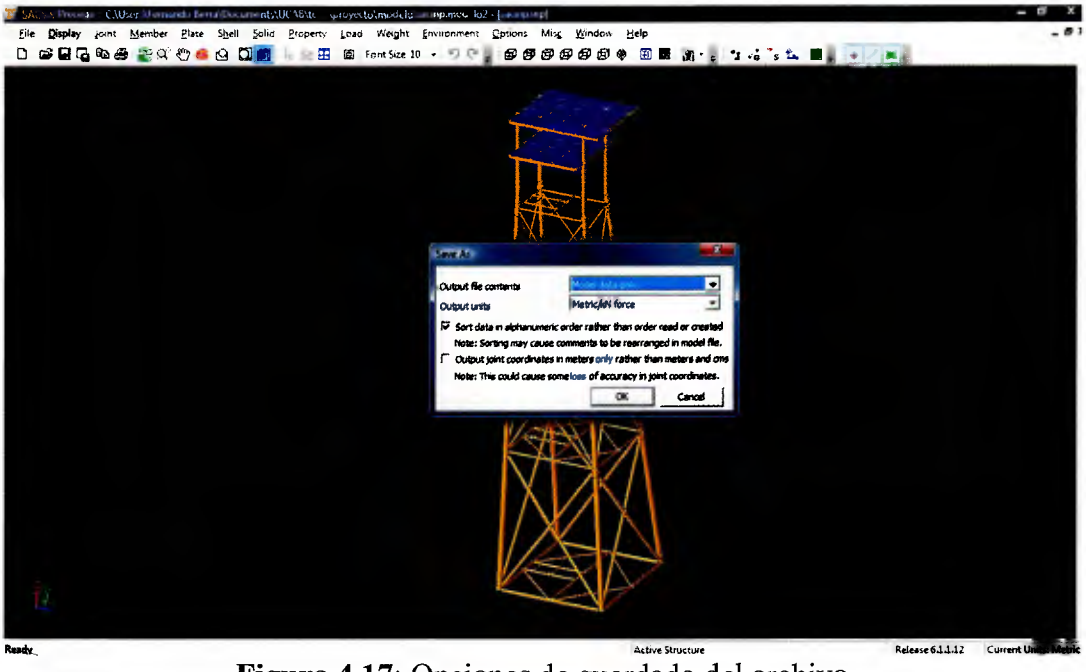


Figura 4.17: Opciones de guardado del archivo
Fuente: SACS ver. 5.3

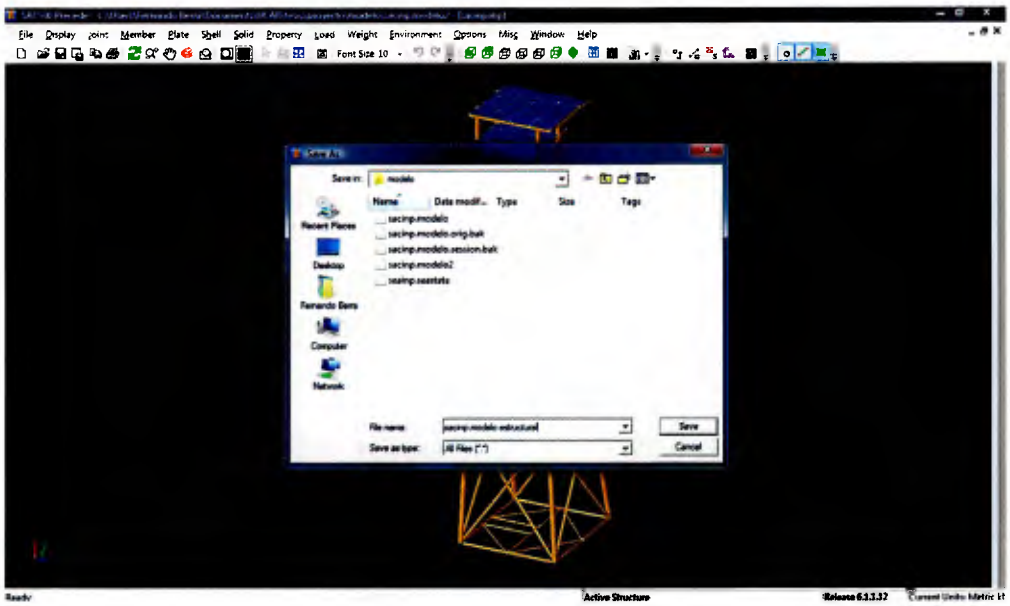


Figura 4.18: Guardado del archivo en SACS
Fuente: SACS ver. 5.3

4.3 Análisis Espectral de Fatiga en SACS versión 5.3

El análisis espectral de fatiga es bastante complejo y numéricamente intensivo. El software SACS es una buena herramienta que facilita la ejecución de este análisis, en especial en la parte numérica, sin embargo es un programa poco amigable y complicado a la hora de usar. Para poder llevar a cabo el análisis espectral de fatiga, es necesario seguir una serie de pasos los cuales requieren orden y buen conocimiento del uso del programa, para obtener los resultados esperados.

La metodología general para el diseño de una estructura costa afuera fija tipo jacket a través de un análisis espectral de fatiga causado por oleaje marino, se resume en los siguientes pasos:

1. Modelado detallado de la estructura, que represente todas las propiedades de la misma.
2. Análisis modal para conocer la frecuencia natural de la estructura.

3. Análisis de respuesta de oleaje para cada dirección para obtener el rango de esfuerzos nominales.
4. Conocer el factor de concentración de esfuerzos (SCF) de cada junta que vaya a ser evaluada y combinarlo con los rangos de esfuerzo nominales, obteniendo los esfuerzos en los *hotspots*.
5. Cálculo del daño por fatiga basado en la curva S–N apropiada en conjunto con los esfuerzos en los *hotspots* y el número de ocurrencia de olas.
6. Cálculo del daño acumulativo de fatiga usando la regla de Palmgren–Miner, para determinar la vida útil de servicio de cada una de las juntas evaluadas.
7. Comparación de la vida útil de servicio obtenida con la vida útil de diseño. Si la vida útil de servicio es mayor a la vida útil de diseño, la junta es considerada como aceptable, de caso contrario, la junta requiere un rediseño.

La Tabla 4.1 que se muestra a continuación, detalla la secuencia usada para realizar el análisis espectral de fatiga en el programa SACS.

Tabla 4.1: Secuencia del análisis espectral de fatiga en el programa SACS.

No	Archivos de Entrada	Ejecución del programa	Archivos de Salida
1	**Análisis Dinámico de Extracción de Modos**		
	Datos estructurales	*extracción de modos*	Archivo de masa
	Datos ambientales		Archivo de modos
			Archivos de lectura
2	**Análisis de Respuesta de Oleaje**		
	Datos estructurales	*respuesta al oleaje*	Archivo de solución común
	Datos de oleaje		Archivos de lectura
	Archivo de masa		
	Archivo de modos		
3	**Análisis Espectral de Fatiga**		
	Datos de fatiga	*Daño por fatiga*	Archivos de lectura
	Archivo de solución común		

NOTA: Los recuadros coloreados, muestran los archivos de salidas que deben ser usados como archivos de entrada en el paso siguiente.

Paso 1: Análisis Dinámico de Extracción de Modos

El análisis modal se realiza para determinar las características dinámicas de la estructura, de esta forma se puede conocer la frecuencia natural de la misa. En este análisis el programa utiliza las masas de los miembros de la estructura junto con las cargas aplicadas. Para poder obtener resultados acordes con la realidad, es necesario conocer las condiciones ambientales normales a las que se espera que esté expuesta la estructura, es decir, las condiciones con una probabilidad de ocurrencia de un 100%. Dichas condiciones serán tomadas como cargas aplicadas sobre la estructura solo para el análisis dinámico y están expuestas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Condiciones ambientales normales a las que está expuesta la estructura

Datos de la ola de 1 año		**Nota**
Altura (m)	6.10	
Periodo (seg)	12	
Tipo de ola	Stream 3	Según gráfica norma API
Factor cinemática	1	Para zona extra tropicales
Datos del viento de 1 año		
Altura (m)	10	
Velocidad (m/s)	25.72	
Datos de la corriente de 1 año		
Velocidad en la superficie (m/s)	0.514	
Velocidad en la fondo (m/s)	1.029	
Factor de bloqueo	0.85	Por ser una estructura de 4 piernas
Datos crecimiento marino		
De 0 m a 60 m sobre el fondo		
Espesor (cm)	2.5	
Densidad (T/m3)	1.4	
De 60 m a 79.5 m sobre el fondo		
Espesor (cm)	5.0	
Densidad (T/m3)	1.4	

Otros datos		
Coeficiente de arrastre	0.60	Según norma API
Coeficiente de inercia	1.20	Según norma API

NOTA: Estas condiciones se van a aplicar en 3 direcciones; 0°, 45° y 90°.

Para realizar el análisis dinámico, se deben agregar los datos de las condiciones ambientales normales. Para ello, primero se abre el archivo que se había guardado de la estructura modelada, una vez se observa la pantalla del modelo, se abre el menú **"Enviroment"**, **"Loading"** y se selecciona la opción **"Seastate..."**. Esto abrirá un cuadro de dialogo con el título **"Seastate Load Generation"**, aquí se agregan las cargas de los diferentes estados marinos que se quieran generar. En el recuadro de **"Load condition"** se le asigna el nombre al estado marino correspondiente a la dirección de 0°, y luego se procede a darle check a los recuadros de **"Wave"**, **"Wind"**, **"Currente"** y **"Dead load"**, esta última opción es para que el programa tome en cuenta la flotabilidad de estructura, la cual la genera como una carga vertical hacia arriba. Se agregan los datos del estado marino expuestos en la Tabla 4.2 y se presiona **"Apply"**. Una vez generado el primer estado marino, se coloca el nombre de las cargas en dirección 45°, se asegura que la opción de **"Add"** se encuentre seleccionada, y se cambian las direcciones de la ola, el viento y la corriente a 45°, se presiona **"Apply"** nuevamente y se repite el mismo procedimiento para generar el estado marino en la dirección de 90°.

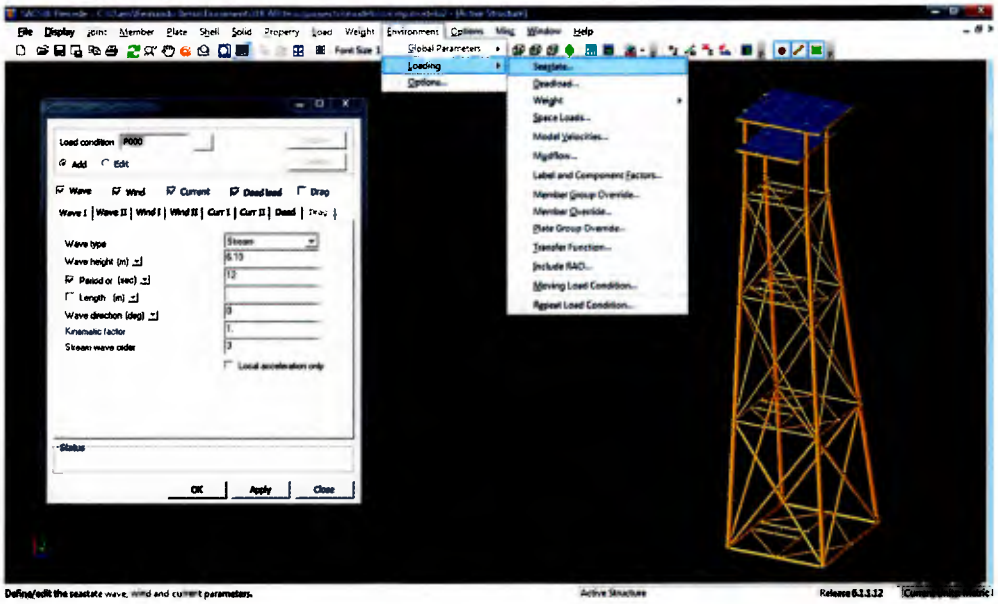


Figura 4.19: Opciones de oleaje del estado marino en dirección 0°.
Fuente: SACS ver. 5.3

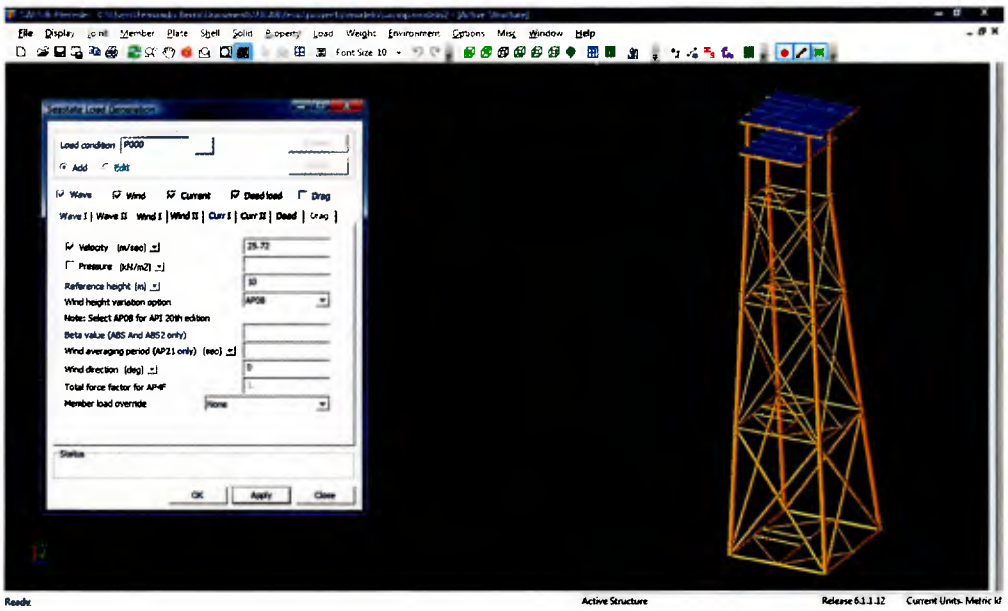


Figura 4.20: Opciones de viento del estado marino en dirección 0°.
Fuente: SACS ver. 5.3

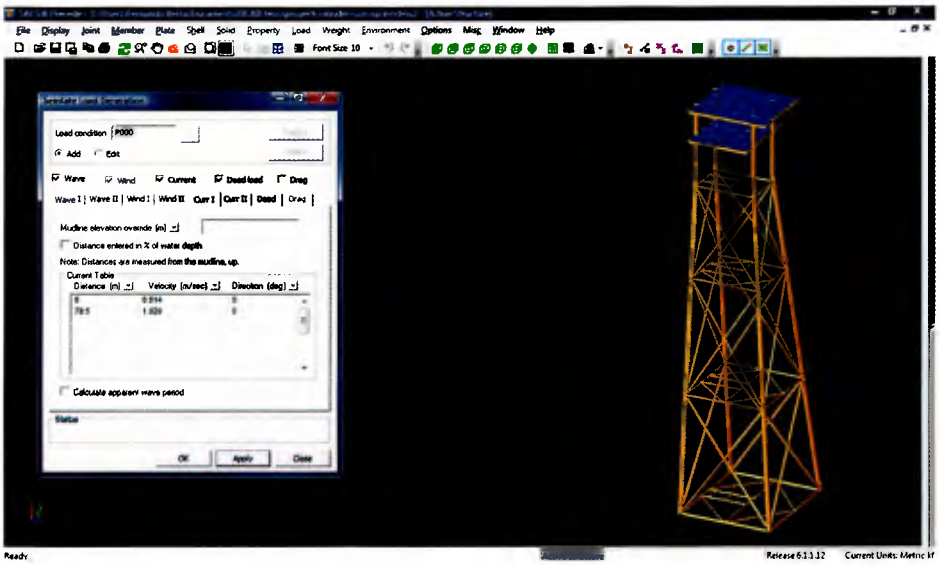


Figura 4.21: **Opciones de corriente del estado marino en dirección 0°.**
Fuente: SACS ver. 5.3

Para agregar los datos del crecimiento marino, se abre el menú **"Enviroment"**, **"Global Parameters"**, se selecciona la opción **"Marine Growth…"**. De esta forma se abre un cuadro de dialogo con el título **"Marine Growth Data"** donde se procede a colocar los datos del crecimiento marino como se muestra en la Figura 4.22.

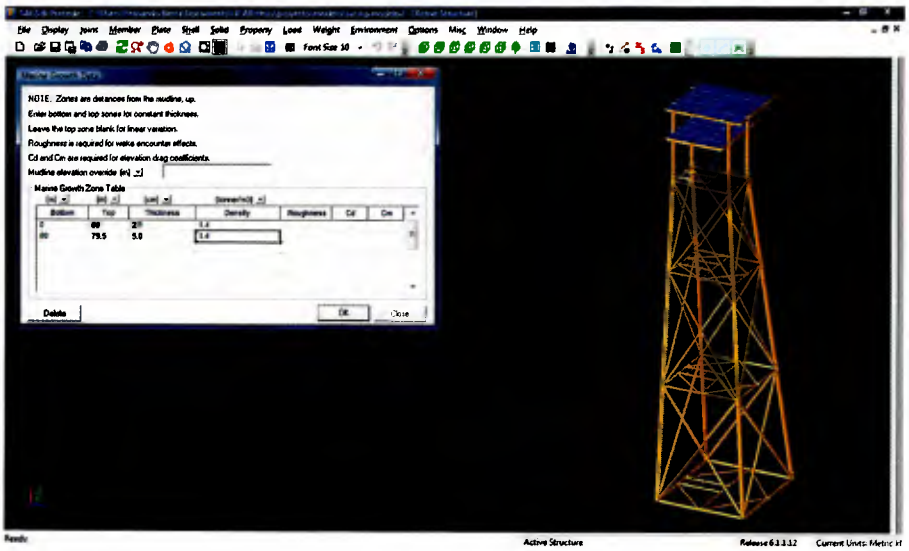


Figura 4.22: **Opciones** de creciente marina
Fuente: SACS ver. 5.3

Para añadir los datos de los coeficientes de arrastre y de inercia, se abre el menú **"Enviroment"**, **"Global Parameters"**, se selecciona la opción **"Drag/Mass Coefficient..."**. De este modo se abre un cuadro de dialogo con el título **"Drag and Mass Coefficient Table"** donde se procede a colocar los datos de los coeficientes de arrastre y de inercia como se muestra en la Figura 4.23.

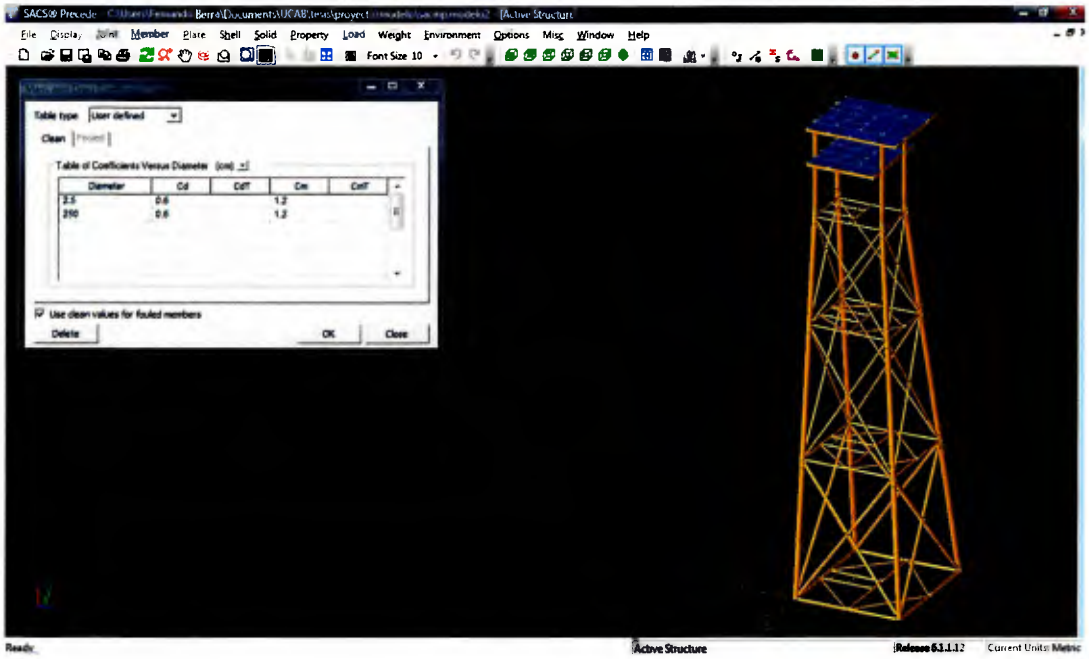


Figura 4.23: Opciones de coeficiente de arrastre e inercia.
Fuente: SACS ver. 5.3

Para guardar los datos ambientales, se realiza el mismo procedimiento que se hace para guardar el modelo estructural, pero se elije la opción de **"Seastate Data Only"**, y se guarda colocando primero la extensión **"seainp."** y luego el nombre del archivo. De este modo tenemos los archivos de los datos estructurales y ambientales necesarios para el análisis dinámico.

Para realizar el análisis dinámico, primero se recomienda crear una carpeta nueva donde se van a copiar los archivos del modelo y de los datos ambientales previamente creados, esto debido a que el archivo del modelo estructural tiene que ser modificado. Se abre el

archivo del modelo estructural copiado y dentro del menú **"Joint"** se selecciona la opción **"Fixities..."**. Con el nuevo cuadro de dialogo, se escogen las cuatro juntas de las esquinas del nivel del fondo, es decir, en la cota -79.5, las juntas seleccionadas deben pertenecer a las piernas de la estructura y no a los pilotes, y en el recuadro de la opción **"Enter or select new fixity"**, se escribe **222000**, esto es para indicarle al programa donde se van a restringir los grados de libertad de la estructura. Esto se debe repetir para las alturas -50; -21; +2; 15.3 y 23; siempre con las juntas de las esquinas y que pertenezcan a las piernas.

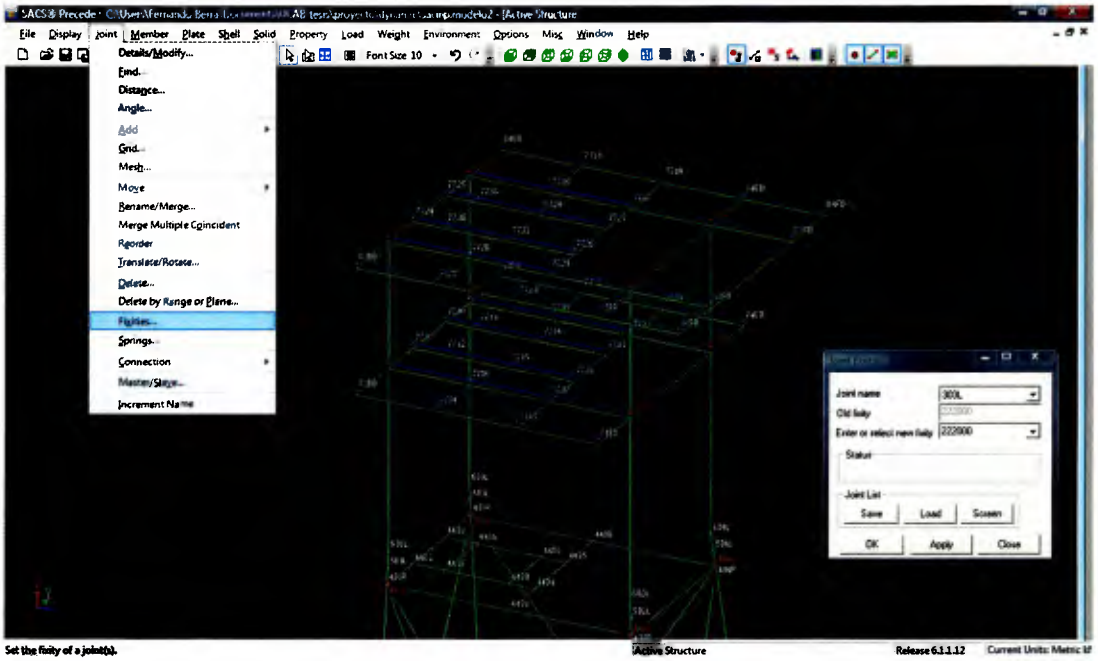


Figura 4.24: Restricción de los grados de libertad de la estructura
Fuente: SACS ver. 5.3

Se guarda el archivo del modelo estructural y se procede a realizar el análisis dinámico. En la interfaz principal del programa SACS, dentro de la pestaña de **"File"**, se abre la carpeta designada para el análisis dinámico la cual debe tener el archivo del modelo modificado y el archivo de los datos ambientales. En la pestaña de **"Analisis Generator"**, en la opción de tipo de análisis se elige **"Dynamics"** y como subtipo se selecciona **"Extrac**

Mode Shapes". Se hace click en la opción de **"Display Option"** para abrir la venta de **"Analysis Options"**, dentro de esta ventana se cambian las siguientes opciones:

- **"Seastate Input In Model File"** se escoge **"NO"**
- **"Seastate Input File"** se elige el archivo con la extensión **"seainp."**
- **"Include Superelement File"** se escoge **"NO"**
- **"Use Dympac Input File"** se escoge **"NO"**
- **"Number Of Modes"** se escribe **"10"**

Se presiona **"OK"** y en la opción de **"SACS Model File"** se elige el archivo con la extensión **"sacinp."**, finalmente se hace click en **"Run Analysis"** y se espera que el programa realice el análisis dinámico. Al terminar el análisis se van a crean los archivos con las extensiones **"dynmod."**, **"dynmas."** y **"dynlst."**, los dos primeros serán usados posteriormente y el último muestra los resultados del análisis.

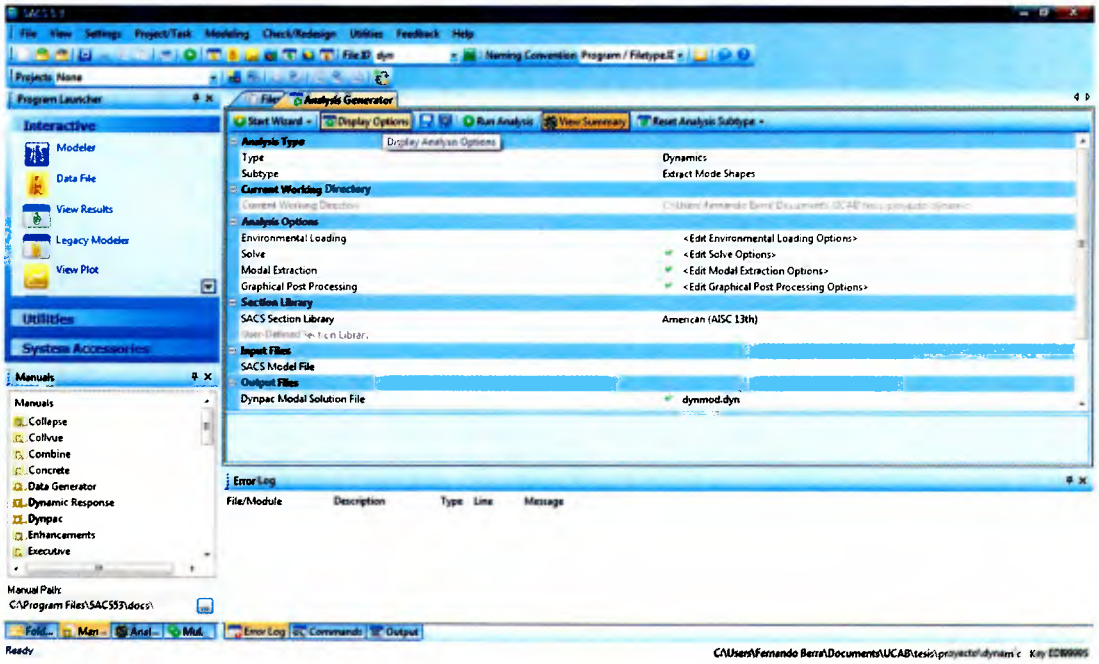


Figura 4.25: Opciones general de análisis en SACS
Fuente: SACS ver. 5.3

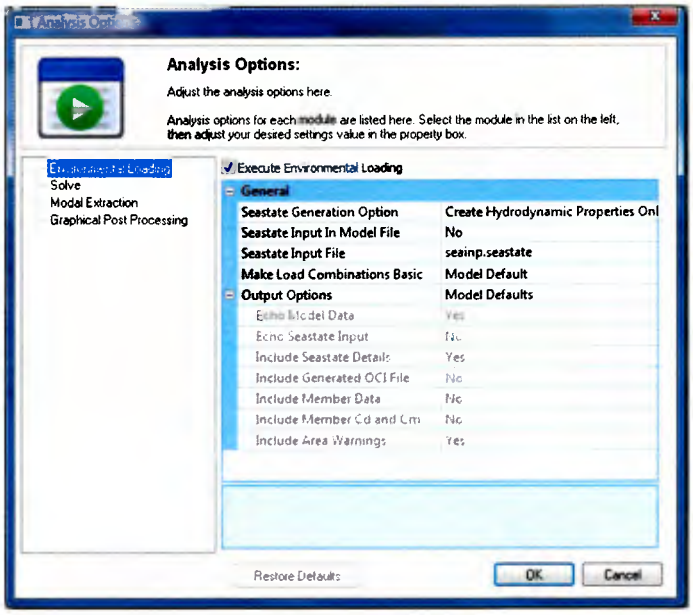


Figura 4.26: Opciones del análisis dinámico
Fuente: SACS ver. 5.3

Paso 2: Análisis de Respuesta de Oleaje

El análisis de respuesta de oleaje ayuda a determinar la respuesta dinámica de la estructura cuando está sujeta a acciones de oleaje. El programa toma en cuenta la acción del oleaje en conjunto con el análisis dinámico modal para calcular las cargas a las que van a estar sujetas los miembros de la estructura. Este análisis se divide en dos partes; la primera es para determinar la función de trasferencia, también conocida como espectro de respuesta de oleaje, y la segunda es para obtener los archivos de solución común usados en el análisis de fatiga.

Antes de iniciar el análisis se recomienda crear una carpeta nueva, como se hizo con el análisis dinámico, donde lo primero que se va hacer el copiar los archivos del modelo y de los datos ambientales originales. Una vez copiados, se abre el archivo de los datos ambientales y se abrirá la ventana de generador de datos, como la de la Figura 4.27.

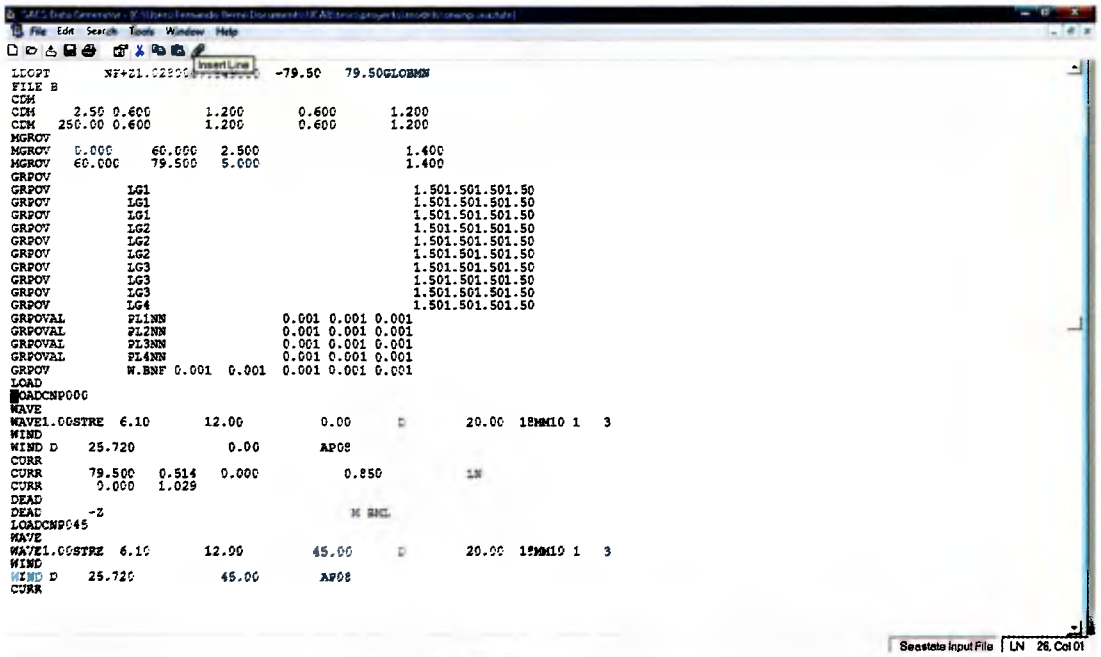


Figura 4.27: Cuadro de generador de datos
Fuente: SACS ver. 5.3

El generador de datos es lo que usa el programa para leer los datos que uno quiere introducir. Dentro de este archivo se deben borrar todas las líneas que se encuentran por debajo de la línea que empieza con **"LOAD"**, y dándole click en **"Insert Line"**, se abre una nueva ventana donde se busca y se selecciona la opción de **"LOADCN (Load Condition)"**, en la nueva ventana se le asigna un nombre a la condición de carga y se presiona **"OK"**. Las Figuras 4.28 y 4.29 muestran la secuencia.

Una vez asignado la condición de carga, se procede a introducir otra línea debajo de esta llamada **"GNTRF (Transfer Funtion Generation)"**, y se colocan los datos como se muestran en la Figura 4.30. Se deben insertar tres líneas correspondientes a las tres direcciones con las que estamos trabajando (0°; 45° y 90°). Con estos datos el programa genera 90 olas, iniciando con un periodo de 10 segundos y disminuyéndolo en razón de 0.1 segundos, y va a determinar los cortes basales que se generan en los miembros por la acción de cada una de las olas por separadas.

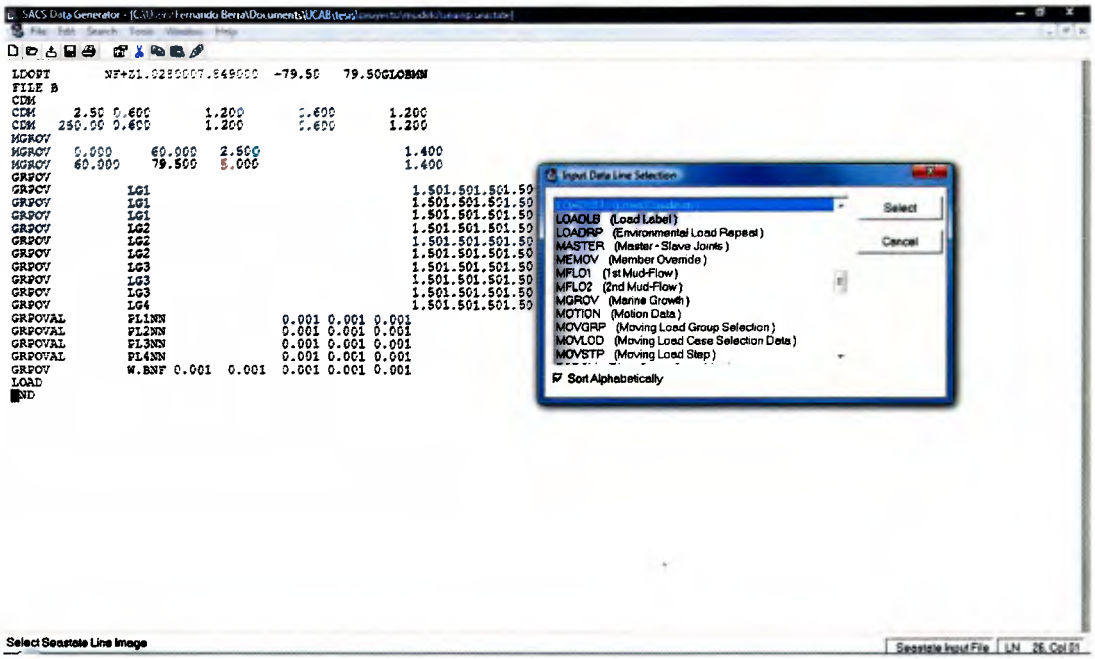


Figura 4.28: Opciones para insertar una línea nueva en el generador de datos
Fuente: SACS ver. 5.3

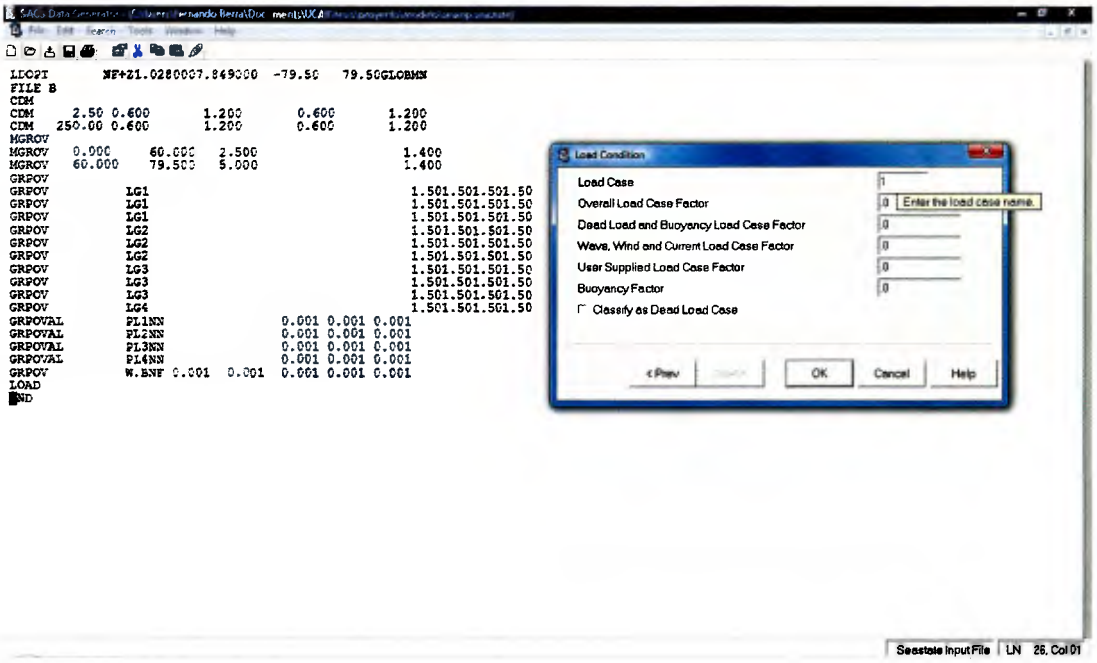


Figura 4.29: Opciones de condición de carga
Fuente: SACS ver. 5.3

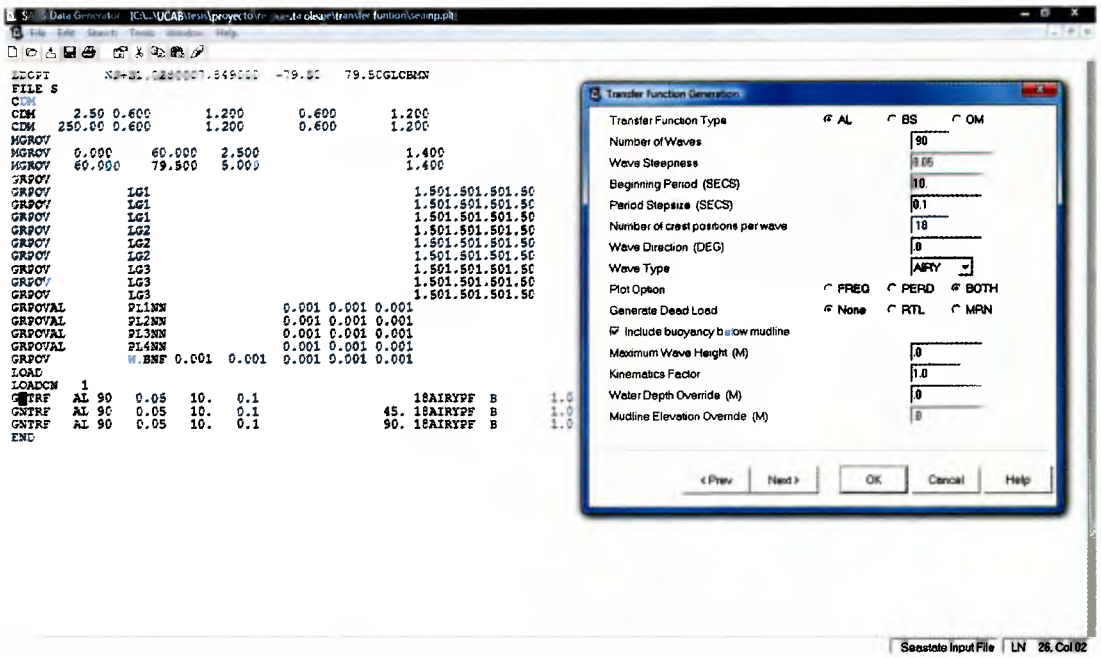


Figura 4.30: Asignación de datos para generar la función de transferencia
Fuente: SACS ver. 5.3

Cuando se hayan insertados los datos indicados anteriormente, se guarda el archivo manteniendo la misma extensión. Para generar la función de transferencia, en las pestaña de generador de análisis del programa SACS, se coloca como tipo de análisis **"Dynamic"** y como subtipo **"Wave Transfer/Response Funtion Generation"**. Como archivos de entradas se utilizan los archivos del modelo, de las cargas de olas y los que se obtuvieron del análisis dinámico. Dentro del cuadro de opciones de análisis, se colocan las opciones como se muestran en las Figura 4.31 y se procede a correr el análisis.

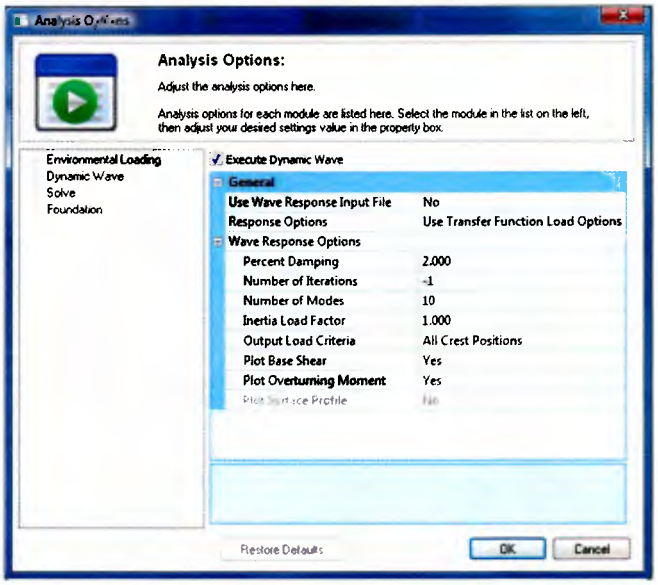


Figura 4.31: Opciones de análisis para hallar la función de trasferencia
Fuente: SACS ver. 5.3

De la función de trasferencia, el cual está dentro de los archivos de lectura del análisis realizado, se eligen 20 olas de acuerdo a los periodos que generan mayores cortes basales sobre los miembros de la estructura. Las 20 olas seleccionadas para realizar la segunda parte del análisis de respuesta de oleaje se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Selección de olas para el análisis espectral de fatiga

Nro. de ola	Periodo (seg.)
1	10
2	9.6
3	7.2
4	5.5
5	5.4
6	4.4
7	3.1
8	3.0
9	2.9
10	2.6

Continuación Tabla 4.3

Nro. de ola	Periodo (seg.)
11	2.5
12	2.2
13	2.0
14	1.9
15	1.8
16	1.7
17	1.6
18	1.5
19	1.4
20	1.1

Nota: los periodos deben estar ordenados de forma descendente

La segunda parte del análisis de respuesta de olaje es muy parecida a la primera, sólo que se va a trabajar con las 20 olas que se han seleccionado anteriormente. Primero se recomienda crear tres carpetas donde se deben copiar los archivos de modelaje y de datos ambientales originales, cada carpeta tendrá la respuesta de oleaje en dirección 0°; 45° y 90°. Se debe modificar el archivo de los datos ambientales de la misma forma como se hizo previamente, con la única diferencia que ahora se va a introducir una línea de **"GNTRF (Transfer Funtion Generation)"** por cada una de las olas que hemos seleccionado. La Figura 4.32 muestra cómo queda el archivo.

Una vez creado el archivo con los datos de las 20 olas seleccionadas, se procede a realizar el análisis siguiendo el mismo procedimiento que en la primera parte, y de esta forma se obtiene el archivo de solución común de respuesta de oleaje en la dirección de 0° necesario para el análisis espectral de fatiga. Este mismo procedimiento se debe realizar para generar los archivos de solución común para las direcciones de 45° y 90°, cada uno por separado.

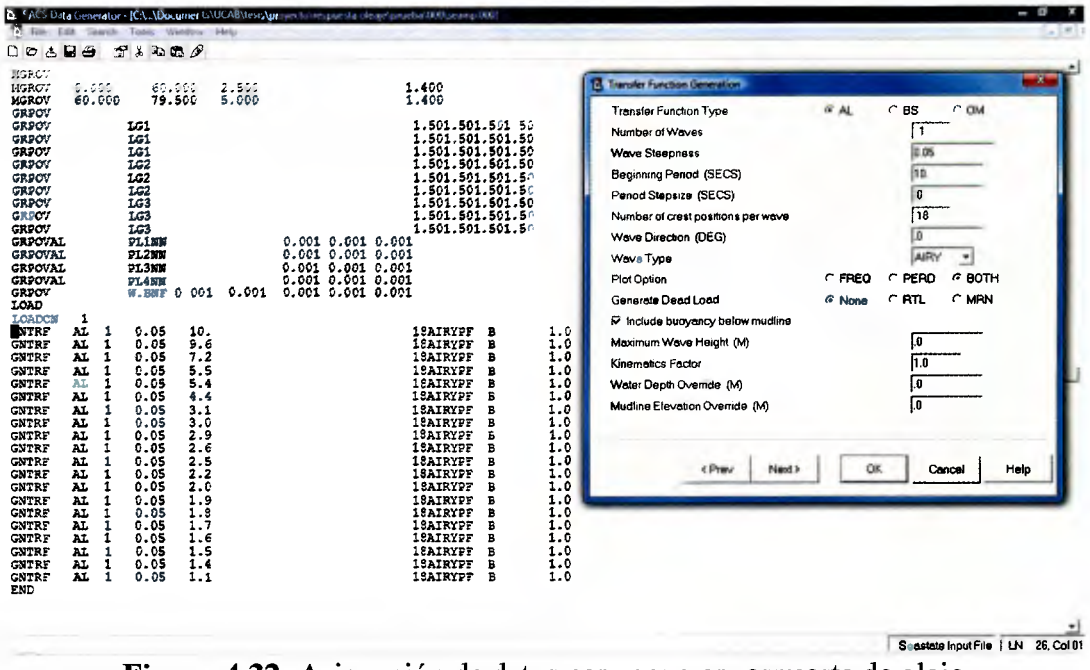


Figura 4.32: Asignación de datos para generar respuesta de olaje
Fuente: SACS ver. 5.3

Paso 3: Análisis Espectral de Fatiga

En el análisis espectral de fatiga realizado en el programa SACS, se evalúa el rendimiento de la estructura con respecto a las fallas por fatiga. Utiliza los resultados del análisis dinámico modal y del análisis de respuesta de oleaje para conocer los esfuerzos en las juntas tubulares soldadas de la estructura, luego dichos esfuerzos son multiplicados por el factor de concentración de esfuerzos (SCF) y de este modo tener los rangos de esfuerzos que van a ser evaluados.

El rango de esfuerzo resultante es usado posteriormente para determinar los daños de cada junta tubular y finalmente, calculando el número de ocurrencia de cada rango de esfuerzo a través del diagrama de dispersión y basándose en la curva S-N, el programa puede dar una estimación de los años de servicio de cada junta.

La curva S-N que se va a tomar para el diseño es la que establece la norma API y el diagrama de dispersión del oleaje es facilitado por el ejercicio y se presenta en la Figura 4.33.

- **Wave Scat diagram:**

Table 1: 0.0 direction

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.15	0.10	0.10
2.0 - 4.0	0.10	0.19	0.11
4.0 - 6.0	0.05	0.08	0.05
6.0 - 10.0	0.02	0.03	0.02

Table 2: 45.0 direction

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.10	0.13	0.08
2.0 - 4.0	0.15	0.13	0.10
4.0 - 6.0	0.08	0.08	0.07
6.0 - 10.0	0.03	0.02	0.03

Table 3: 90.0 degree

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.13	0.10	0.08
2.0 - 4.0	0.13	0.15	0.10
4.0 - 6.0	0.06	0.09	0.08
6.0 - 10.0	0.03	0.03	0.02

Figura 4.33: Diagrama de dispersión del oleaje
Fuente: Archivo SACS Training Example Practice

Como en los análisis anteriores, lo primero que se recomienda es crear una carpeta donde se guardan todos los archivos del análisis espectral de fatiga. Una vez creada la carpeta se procede a crear el archivo de los datos de fatiga siguiendo la siguiente secuencia.

En la interfaz principal del programa SACS, se selecciona la opción **"Data File"** ubicado en el menú **"Interactive"**, se seleciona **"Create new data file"** y se presiona **OK**.

Esto abrirá la ventana de **"Data Generator"** y dentro de las opciones de **"Post Processing"** se selecciona la opción de **"Fatigue"** y se presiona **"Select"**.

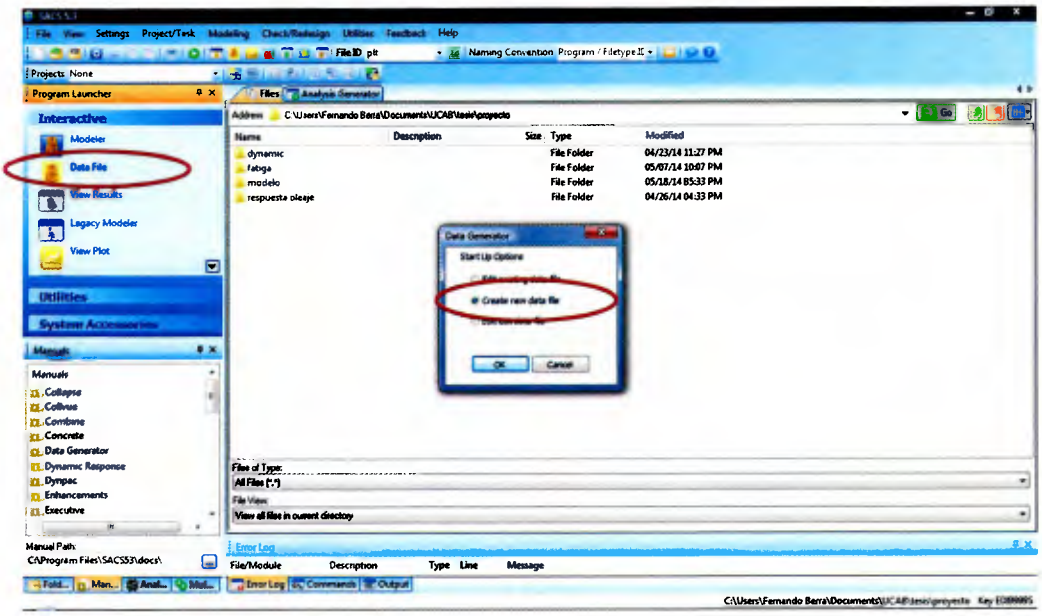


Figura 4.34: Creación de nuevo archivo de datos
Fuente: SACS ver. 5.3

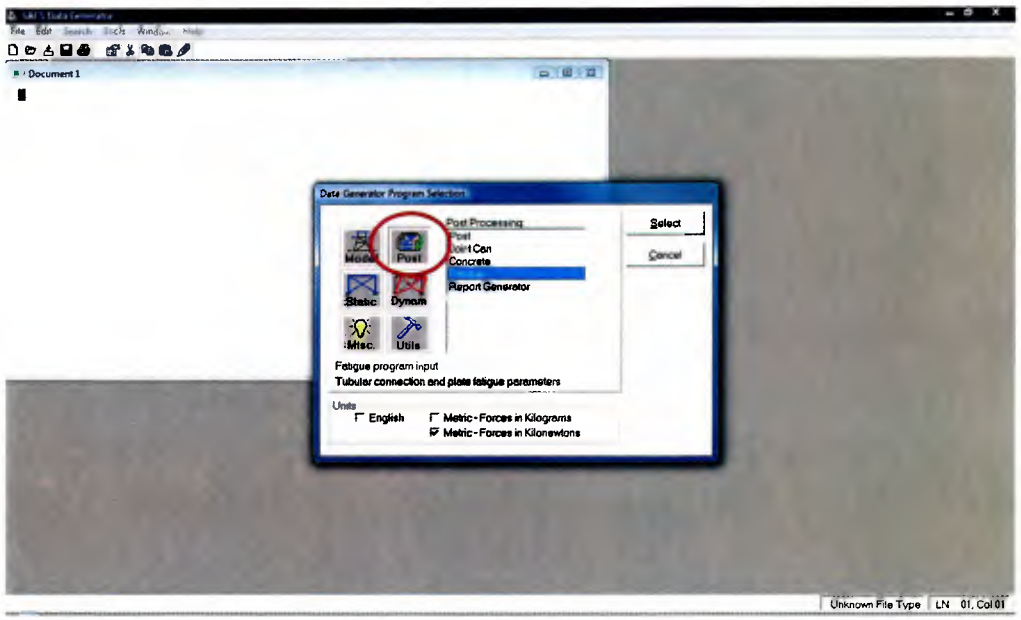


Figura 4.35: Selección de archivo de fatiga
Fuente: SACS ver. 5.3

Se presiona **No** en la opción del título y en el siguiente cuadro se selecciona la opción **"Spectral Wave Fatigue"** y hacer click en **"Next"**. En el cuadro de **"Fatigue Options"** se colocan los datos como se muestran en la Figura 4.36.

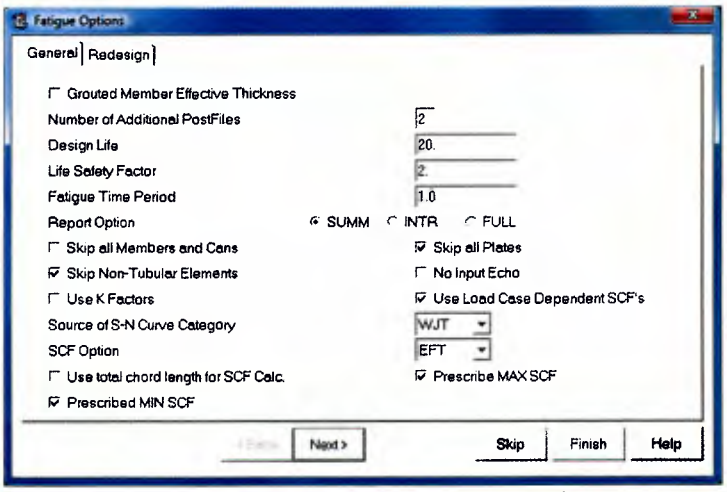


Figura 4.36: Datos de opciones de fatiga
Fuente: SACS ver. 5.3

Se presiona **"Next"** y se introducen los datos en el cuadro de **"Fatigue Options 2"** como se muestra a continuación.

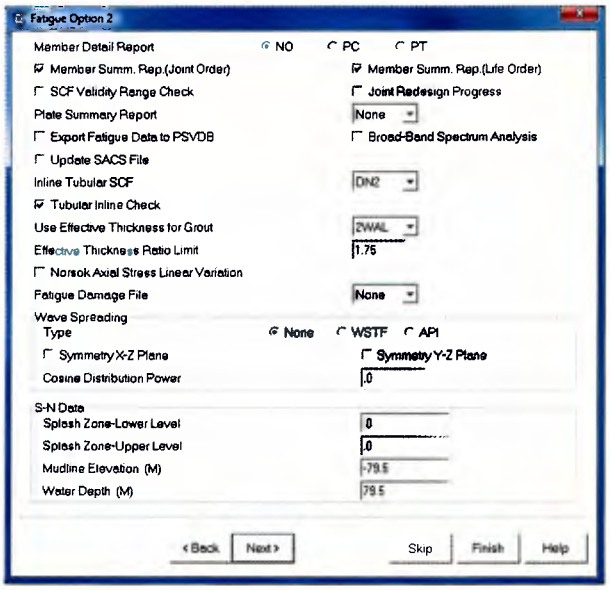


Figura 4.37: Datos de opciones de fatiga 2
Fuente: SACS ver. 5.3

Después de introducir los datos iniciales se presiona **No** a todas las opciones hasta que aparezca **"Remove groups from the analysis?"**, en la cual se presiona **Yes** y en el cuadro siguiente se escribe **W.B** en la primera casilla y se presiona **Next**.

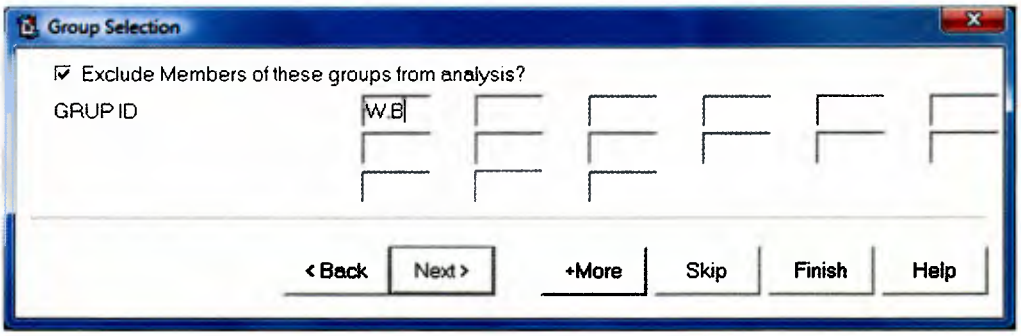


Figura 4.38: Opciones para remover grupo del análisis
Fuente: SACS ver. 5.3

Se presiona **No** a todas las opciones siguientes hasta que aparezca la opción **"Place upper or lower bounds on the SCFs?"**, se hace click en **Yes** y escribimos como máximo valor para el factor de concentración de esfuerzos **5.0** y como mínimo le asignamos **1.6**.

Figura 4.39: Opciones de límites para SCF
Fuente: SACS ver. 5.3

Una vez asignados los limites pata el factor de concentración de esfuerzos y hacer click en **Next**, se presiona **No** a las siguientes dos opciones y luego se hace click en **Yes** a la opción **"Is the transfer funtion data to be taken from SEASTATE?"**, se escribe **18** en el recuadro que aparece seguidamente.

El siguiente cuadro es para asignar el primer caso de fatiga, el cual corresponde en la direccion de 0°, y los datos se introducen como se muestra en la Figura 4.40, y posteriormente el programa pregunta si se va a desarrollar el diagrama de dispersion, al cual se presiona **Yes**.

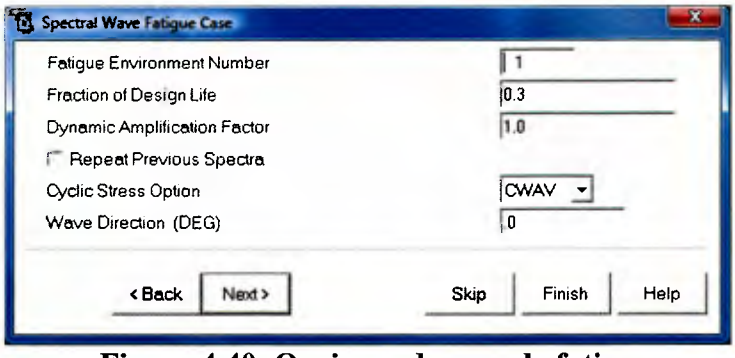


Figura 4.40: **Opciones de caso de fatiga**
Fuente: SACS ver. 5.3

En el siguiente cuadro se colocan las opciones como se muestra en la Figura 4.41, luego se presiona **No** para colocar factores de ocurrencia.

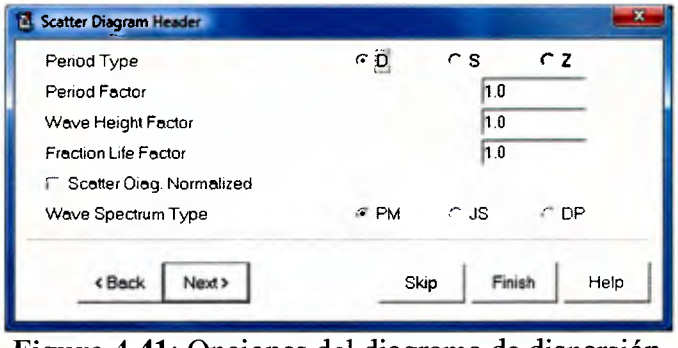


Figura 4.41: Opciones del diagrama de dispersión
Fuente: SACS ver. 5.3

En la ventana siguiente se introducen los datos de la altura de las olas según lo el cuadro del diagrama de dispersión, se presiona **Next** y en el siguiente cuadro se indica el periodo en segundos de la primera fila y posteriormente se escribes los valores correspondientes a ese periodo. Se le da click en **"+More"** para introducir el siguiente periodo y sus valores correspondientes. En las Figuras 4.42 y 4.43 se muestra la secuencia.

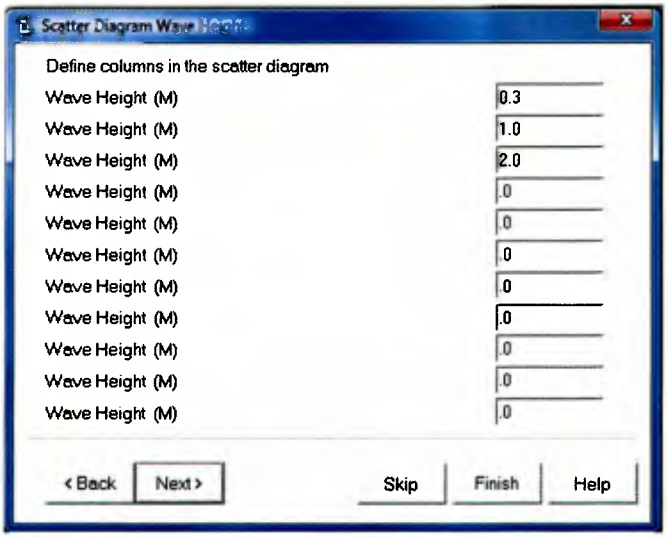


Figura 4.42: **Opciones de alturas de olas del diagrama de dispersión**
Fuente: SACS ver. 5.3

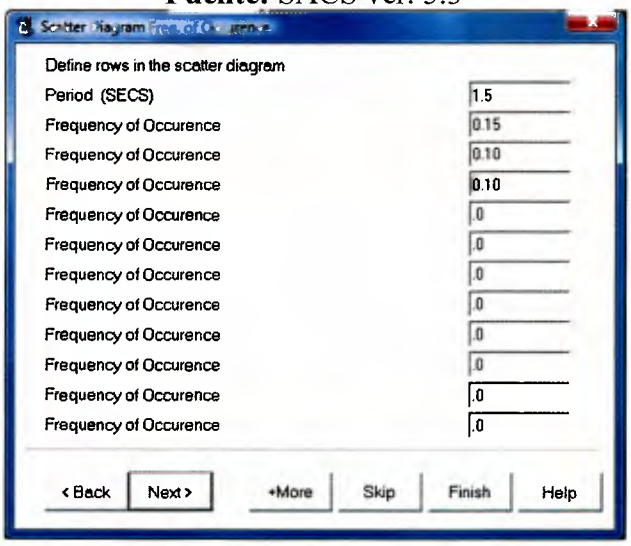


Figura 4.43: Opciones de periodos de olas del diagrama de dispersión
Fuente: SACS ver. 5.3

Una vez introducido los datos del diagrama de dispersión del primer caso de fatiga, el programa pregunta si se va a introducir otro caso, se presiona **Yes**, y se repite el mismo proceso ahora para el segundo y tercer caso correspondiente a la dirección de 45° y 90° respectivamente. El archivo se debe guardar con la extensión **"ftginp."** seguido del nombre del archivo.

Finalmente para realizar el análisis de fatiga, se elige **"Post processing"** como tipo de análisis y **"Fatigue–Spectral (Seastate Generated Transfer Funtion)"**, se colocan los archivos de entrada correspondientes de cada caso y se presiona **"Run Analysis"**.

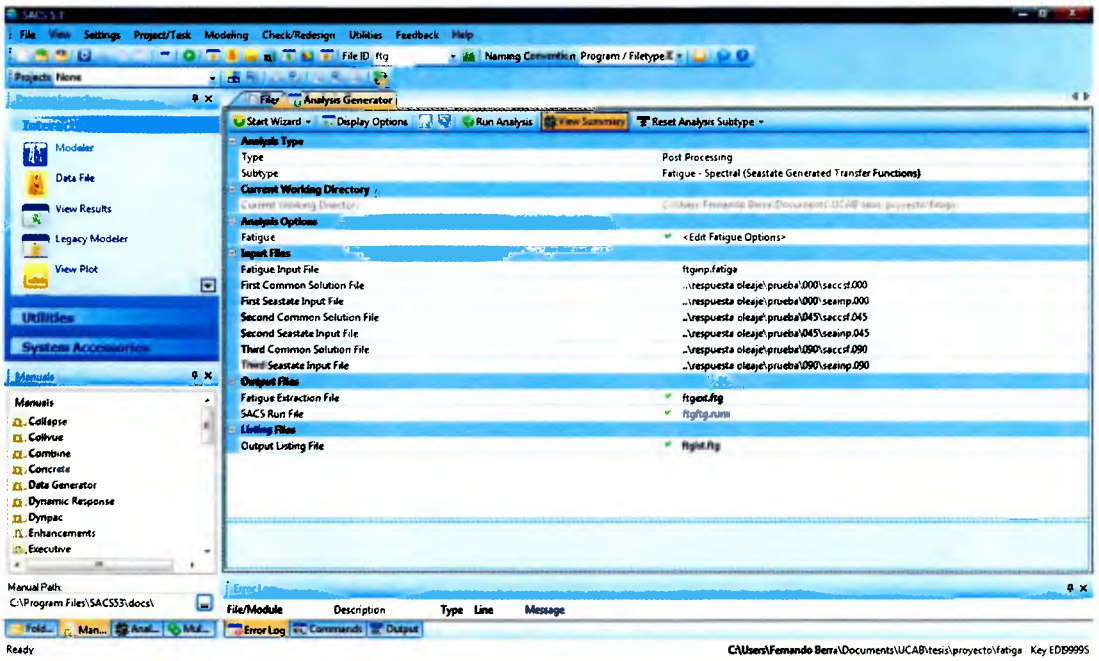


Figura 4.44: Opciones de análisis espectral de fatiga

Fuente: SACS ver. 5.3

CAPITULO V
RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran y se analizan los resultados que se obtuvieron del análisis dinámico modal, análisis de respuesta de oleaje y análisis espectral de fatiga, hecho a un modelo de estructura fija costa afuera, a través del programa SACS versión 5.3.

5.1 Resultados del Análisis Dinámico

Del análisis dinámico modal se obtuvieron 10 modos de la estructura y los periodos naturales de los mismos. Los resultados fueron los siguientes.

SACS Release 5.3 admin
Jacket Definition DATE 23-APR-2014 TIME 23:27:11

SACS IV-FREQUENCIES AND GENERALIZED MASS

MODE	FREQ.(CPS)	GEN. MASS	EIGENVALUE	PERIOD(SECS)
1	0.555538	5.6616644E+02	8.2075440E-02	1.8000580
2	0.622487	4.2161277E+02	6.5370139E-02	1.6064588
3	1.087441	3.0492515E+02	2.1420445E-02	0.9195898
4	1.243992	5.0564772E+02	1.6368357E-02	0.8038637
5	1.329429	1.7448409E+02	1.4332109E-02	0.7522028
6	2.456762	1.6049219E+03	4.1967582E-03	0.4070398
7	3.236460	1.0533109E+03	2.4182420E-03	0.3089796
8	3.752623	1.3646127E+03	1.7987482E-03	0.2664803
9	4.016676	6.5948222E+02	1.5700250E-03	0.2489621
10	4.063278	9.0730893E+02	1.5342184E-03	0.2461067

Figura 5.1: Modos y periodo natural de la estructura
Fuente: SACS ver. 5.3

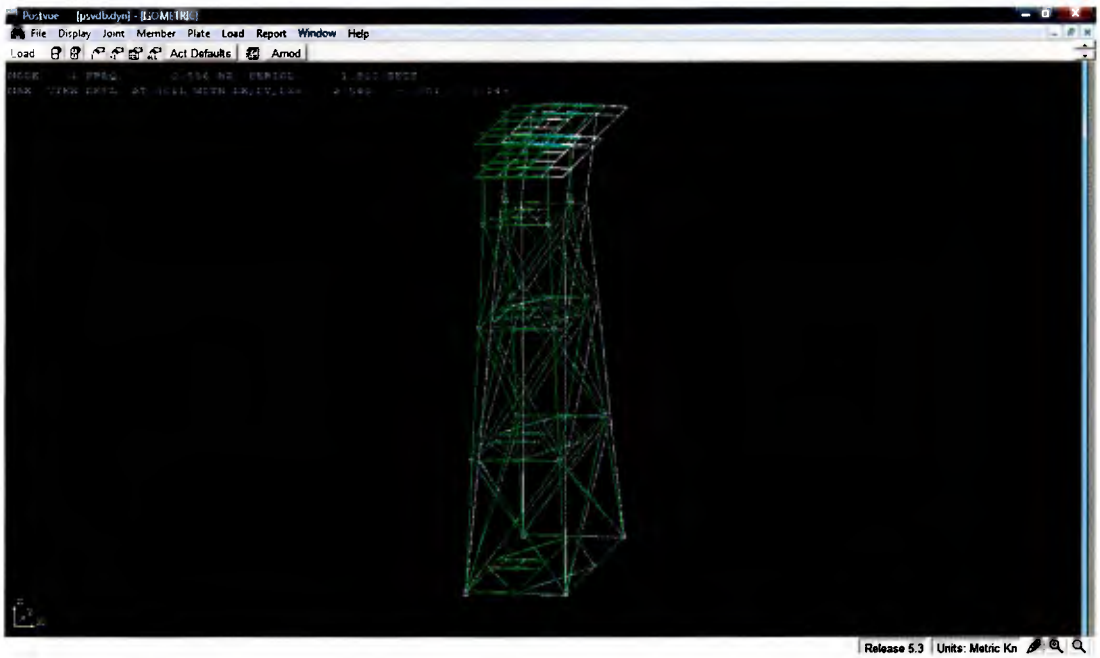


Figura 5.2: Primera forma modal
Fuente: SACS ver. 5.3

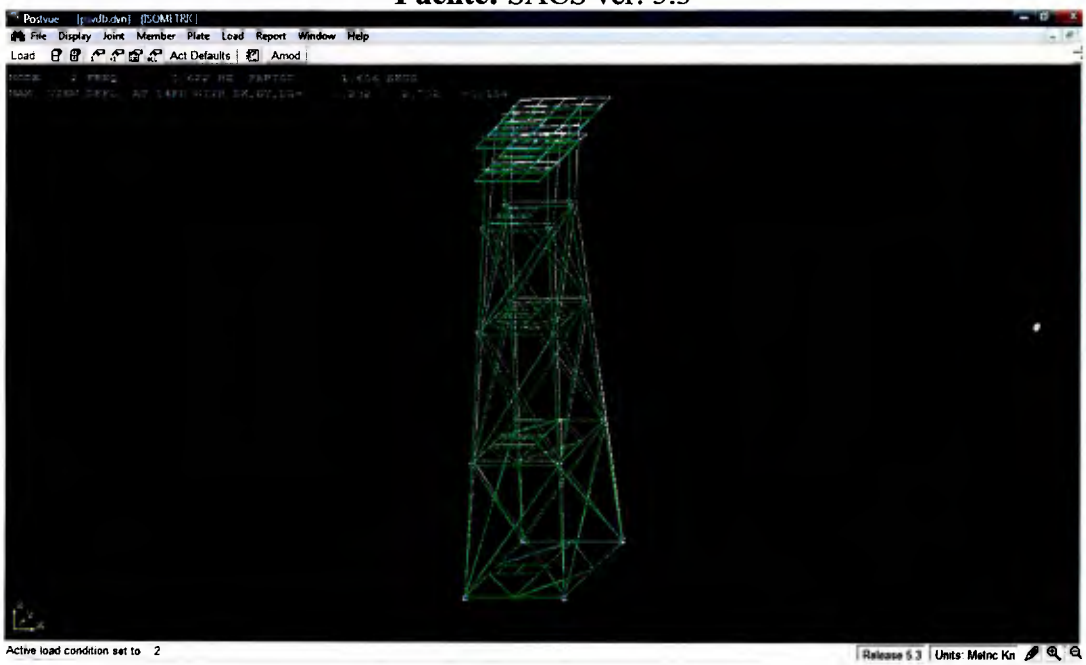


Figura 5.3: Segunda forma modal
Fuente: SACS ver. 5.3

5.2 Resultados del Análisis de Respuesta de Oleaje

Del análisis de respuesta de oleaje se obtuvieron las funciones de trasferencias de la respuesta dinámica de la estructura bajo el efecto del oleaje. Así, se obtuvieron para cada dirección, una gráfica que refleja la variación del corte basal en función de la frecuencia y otra gráfica del corte basal en función del periodo.

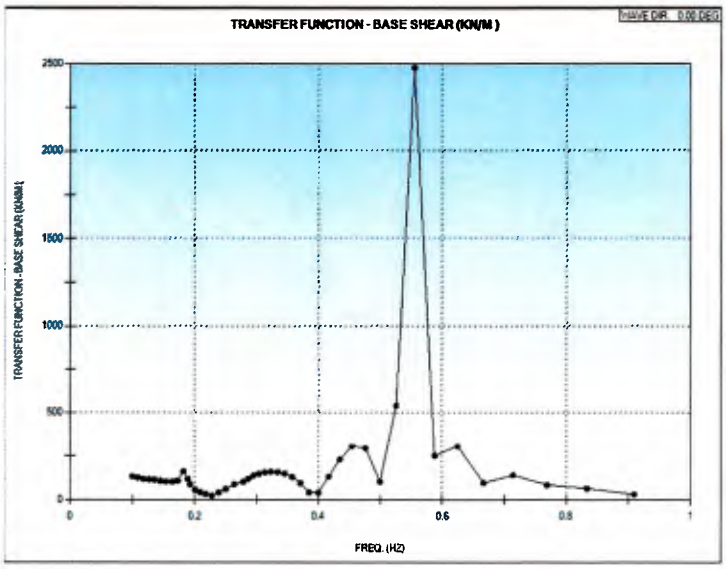


Grafico 5.1: Función de transferencia (Frecuencia vs Corte Basal) en dirección 0°

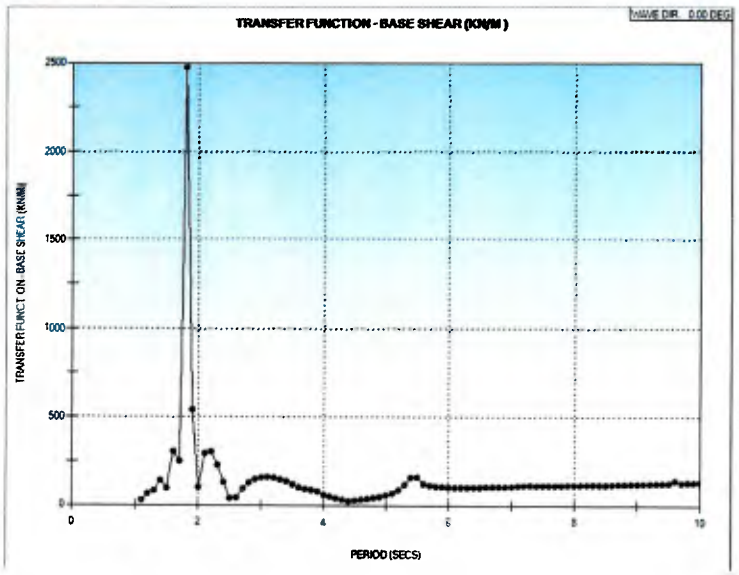


Grafico 5.2: Función de transferencia (Periodo vs Corte Basal) en dirección 0°

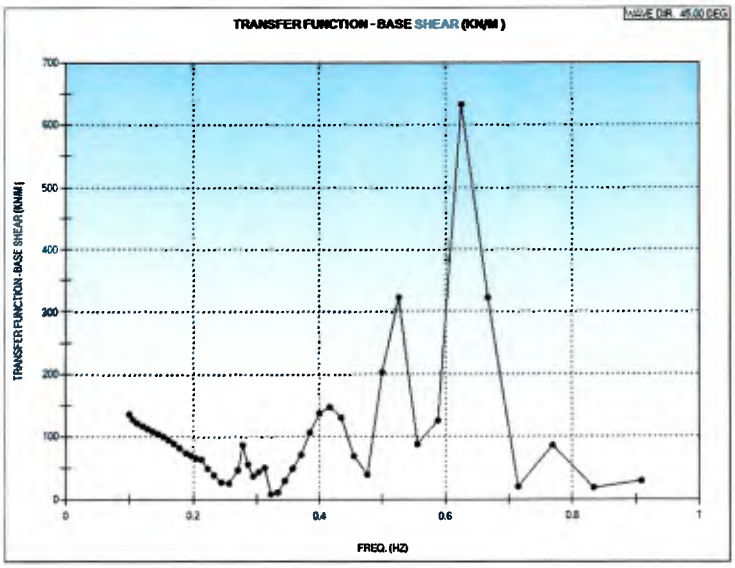


Grafico 5.3: Función de transferencia (Frecuencia vs Corte Basal) en dirección 45°

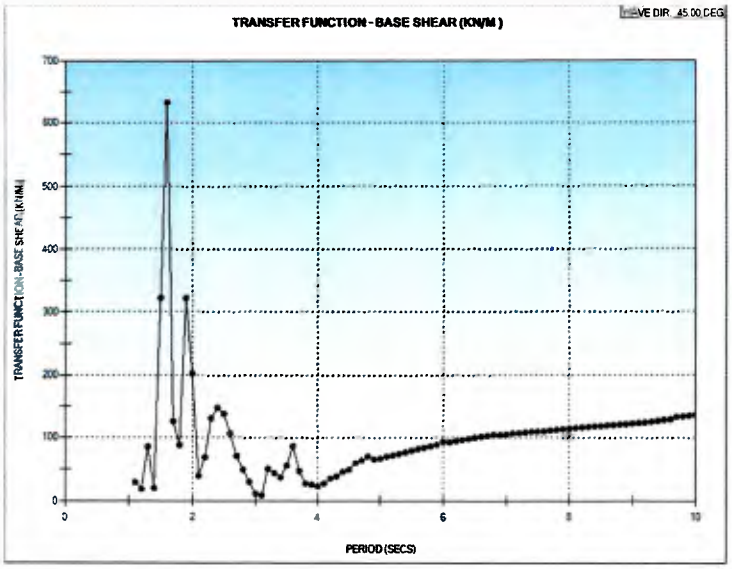


Grafico 5.4: Función de transferencia (Periodo vs Corte Basal) en dirección 45°

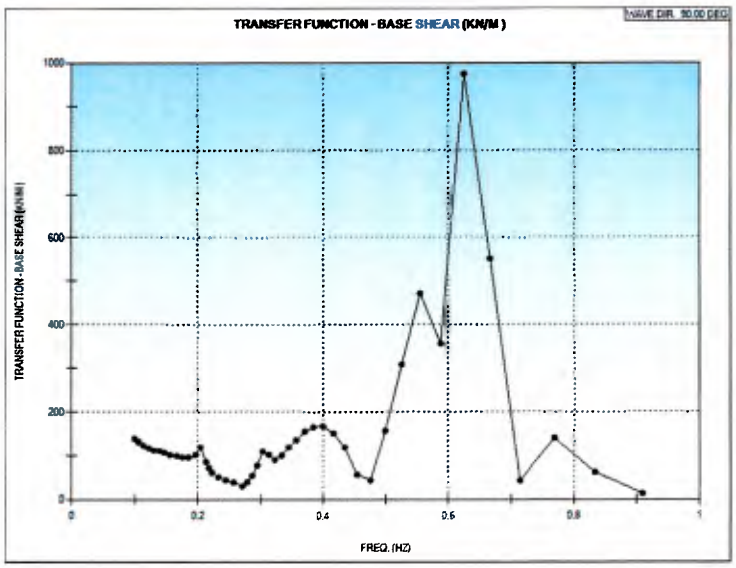


Grafico 5.0.5: Función de transferencia (Frecuencia vs Corte Basal) en dirección 90°

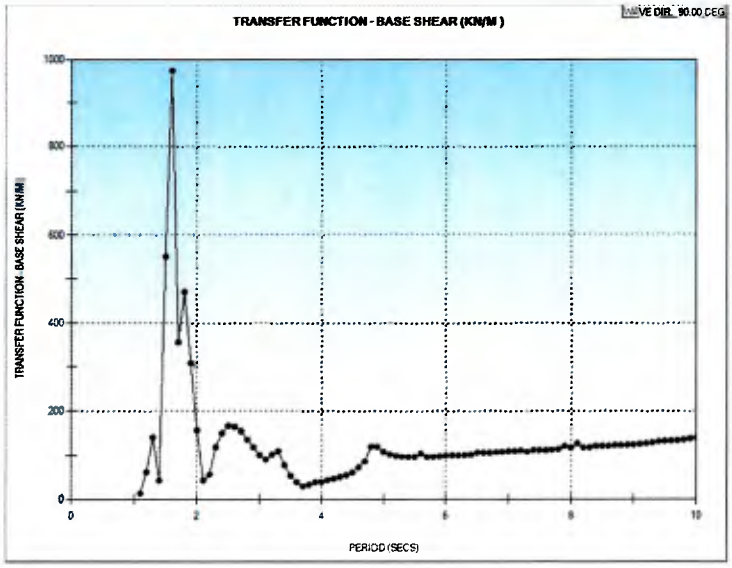


Grafico 5.6: Función de transferencia (Periodo vs Corte Basal) en dirección 90°

En la siguiente tabla se indican los máximos valores del corte basal con sus respectivos periodos para cada dirección.

Tabla 5.1: Máximos valores de los cortantes basales en cada dirección

Dirección	Periodo (seg.)	Corte Basal (kN/m)
0°	1.8	2476.40
45°	1.6	632.54
90°	1.6	974.88

5.3 Resultados del Análisis Espectral de Fatiga

El análisis espectral de fatiga arroja el daño acumulado de cada junta para el periodo de vida de diseño establecido y la estimación de los años de servicio de cada junta. Los resultados presentados a continuación corresponden a las juntas que sufren más daño. En el anexo C se muestran los resultados completos, por orden de daño, del análisis de fatiga obtenido del programa SACS.

Tabla 5.2: Juntas con vida de servicio menor al periodo de vida de diseño

Junta	Miembro	SCF Promedio	Daño	Años de Servicio
401L	401L - 103X	2.50	1.345	14.865
403L	403L - 203X	2.50	1.324	15.108
402L	402L - 103X	2.57	1.149	17.407
402L	402L - 404L	3.28	1.089	18.374
404L	404L - 203X	2.57	1.138	17.582
404L	404L - 402L	3.26	1.137	17.590
104L	104L - 1102	3.50	1.098	18.216
102L	102L - 1102	3.54	1.094	18.275

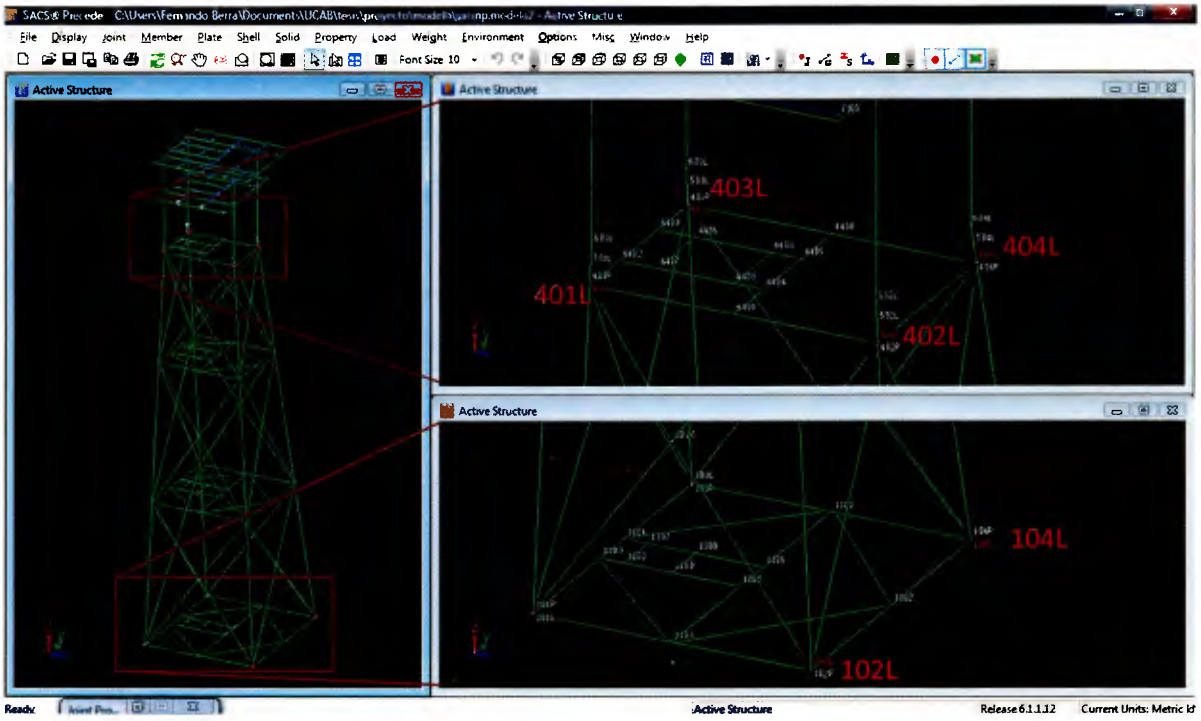


Figura 5.4: Ubicación de las juntas con una vida de servicio menor a la vida de diseño
Fuente: SACS ver. 5.3

5.4 Análisis de Resultados

A continuación se analizará de forma detallada los resultados obtenidos de cada uno de los análisis anteriormente presentados.

5.4.1 Análisis Dinámico

Al realizar el análisis dinámico a la estructura fija tipo jacket se obtienen las formas modales de respuesta dinámica de la misma, así como su periodo natural, como se presentan en la Figura 5.1.

De los 10 modos que se obtienen a partir del análisis dinámico, se toman en cuenta los que tengan periodos mayores o iguales a un (1) segundo, ya que, de acuerdo al diagrama de dispersión mostrado en la Figura 4.33, las olas tomadas en cuenta tienen periodos a partir de

un (1) segundo en adelante. Debido a esto, el primer y el segundo modo, con periodos de 1.80 segundos y 1.60 segundos respectivamente, son los que influyen en los resultados de los análisis posteriores.

Otro aspecto que hay que destacar de estos resultados es que la estructura tiene un periodo natural menor a tres (3) segundos, siendo el mismo de 1.80 segundos, lo que satisface los requerimientos de la norma API.

Asimismo, el periodo natural de la misma se mantiene lejos de los periodos de la mayoría de las olas que la van a estar afectando durante su vida útil. Del diagrama de dispersión se puede observar que las olas con mayor probabilidad de ocurrencia son las que tienen un periodo entre 2 y 4 segundos. Esto es bueno ya que la estructura sufre más daño por el oleaje cuando el periodo natural de la misma coincide con el periodo de la ola que la está afectando, de este modo, se está evitando que la estructura entre en resonancia.

5.4.2 Análisis de Respuesta de Oleaje

Del análisis de respuesta de oleaje se obtuvieron las gráficas de las funciones de trasferencias mostradas anteriormente.

De estas funciones de transferencia, las cuales se tienen para las 3 direcciones estudiadas, se puede observar que cuando el periodo natural de la estructura coincide con el periodo de la ola que la está golpeando, se generan los mayores cortes basales.

Las funciones de transferencia, las cuales representan el espectro de respuesta del oleaje, se encuentran en función del corte basal, cuyas unidades son KN/M. Estas unidades se encuentran en función de la altura de la ola, la cual es un aspecto importante que se debe conocer y que se toma en cuenta cuando se realiza el análisis espectral de fatiga a través del diagrama de dispersión.

También se puede destacar que la ola en la dirección 0°, con un periodo de 1.80 segundos, es la que genera mayor corte basal, muy por encima de cualquier otra ola usada para este análisis.

5.4.3 Análisis Espectral de Fatiga

Del análisis espectral de fatiga, la principal característica que hay que mencionar es que la vida de servicio de las juntas 401L, 402L, 403L, 404L, 102L y 104L dieron menores al periodo de vida de diseño, que en este caso es 20 años, como se muestra en la Tabla 5.2. Esto quiere decir que, probabilísticamente, estas juntas van a fallar por fatiga entes de cumplir con la esperanza de vida de diseño, y según lo que establece la norma API RP 2A – WSD, para estas juntas se requiere realizar un rediseño.

El programa SACS ofrece una opción para rediseño de las juntas, sin embargo, este aspecto no está contemplado en este trabajo especial de grado, ya que solamente se previó el estudio del fenómeno de fatiga y sus consecuencias sobre los miembros de la estructura. No obstante, se puede sugerir que para el rediseño de estas juntas, la primera opción que se debe tomar en cuenta es aumentar los espesores de los miembros tubulares, de este modo disminuirá los esfuerzos y se aumenta a resistencia a la fatiga.

El factor de concentración de esfuerzo (SCF) es calculado para cuatro puntos adyacentes de la conexión entre los miembros, de los cuales el programa utiliza posteriormente un valor promedio para el cálculo de la vida de servicio de la junta.

El aspecto más importante que se puede obtener al analizar estos resultados, es que se conocen las juntas que van a sufrir más daño por parte de las cargas cíclicas generadas por las olas, de este modo, las juntas con la esperanza de vida más bajos, son las que más se le debe prestar atención a la hora de realizar las inspecciones en la estructura.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas de la realización del trabajo especial de grado y se presentarán importantes recomendaciones para trabajos futuros.

6.1 Conclusiones

Luego de realizar las investigaciones, efectuar los cálculos y analizar los resultados obtenidos, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

6.1.2 Relacionadas a la falla ocasionada por la fatiga

1. El análisis de la fatiga es un importante aspecto que hay que tomar en cuenta para el diseño de una estructura fija tipo jacket, los resultados del mismo influyen de manera directa en las características de los miembros que forman parte de la estructura.

2. La fatiga proveniente del oleaje marino puede causar fallas en la estructura, afectando principalmente las conexiones, llevando al colapso de los miembros de la misma sin previo aviso.

3. La forma más común de predecir los daños por fatiga en las estructuras costa afuera es el uso de las curvas S–N y del uso de la regla de daño acumulado de Palmgren–Miner.

4. El análisis de fatiga a partir de las cargas cíclicas provenientes del olaje termina dando resultados probabilísticos, debido a esto, pueden no reflejar la realidad que va a presentar la estructura.

5. A pesar de que los resultados obtenidos del análisis de fatiga son probabilísticos y pueden no representar lo que en realidad va a ocurrir con la estructura, si permite conocer las conexiones que van a sufrir más daño por parte del oleaje marino.

6. La corrosión afecta notablemente la resistencia de los miembros de la estructura, ayudando a la aparición de grietas que ocasionarán fallas por fatiga posteriormente, debido a esto es importante evitar a toda costa los efectos corrosivos a través de la protección catódica.

6.1.2 Relacionadas al Software SACS versión 5.3

1. El programa SACS es una buena herramienta que puede ser usada tanto para modelar como para conocer la respuesta de la estructura bajo el efecto de cargas cíclicas, de esta forma, permite estimar el efecto de fatiga en los miembros estructurales causado por las cargas provenientes del oleaje marino.

2. La norma API RP 2A – WSD recomienda que un análisis de fatiga se debe realizar a todas las conexiones de la estructura y que el servicio de vida de las mismas no puede ser menor al periodo de vida de diseño, asimismo, establece de manera clara todos los parámetros que hay que tomar en cuenta para realizar dicho análisis. Dichos parámetros se encuentran disponibles en el programa SACS

6.1.3 Relacionadas al campo profesional

1. La mejor forma de controlar el efecto de la fatiga es realizando inspecciones anuales a la estructura, de esta forma se puede conocer el estado de las juntas que sufren más daño, así como detectar y estimar la velocidad de propagación de las posibles grietas que se forman, las cuales se deben controlar ya que puedan traer graves consecuencias a mediano y largo plazo. También a través de las inspecciones se examinan las

protecciones catódicas usadas para controlar la corrosión sobre los miembros de la estructura.

6.2 Recomendaciones

Al realizar el análisis de fatiga con el programa SACS, los resultados pueden indicar que algunas juntas van a fallar por fatiga antes de cumplir con la esperanza de vida de diseño, para dichas juntas se puede usar la opción del programa de rediseño de juntas, las cuales quedan a criterio del ingeniero calculista tomar en cuenta o no las recomendaciones de rediseño que ofrece el programa.

Se recomienda el uso del programa SACS para analizar las estructuras costa afuera tipo jacket bajo el efecto de cualquier carga ambiental, e implementarla en el área de explotación costa afuera en Venezuela.

Actualmente el programa SACS es el Software más completo para trabajar en el área de ingeniería costa afuera que se encuentra en el mercado, de esta forma, se recomienda el uso de este mismo por ingenieros especializados en el área costa afuera ya que se necesita una preparación previa de estudio del programa.

El petróleo es el principal recurso de Venezuela, donde este mismo se puede encontrar en gran parte en yacimientos marinos, por esta razón, es importante la implementación de cátedras dentro de la Universidad Católica Andrés Bello en donde se tenga un conocimiento general de la ingeniería costa afuera.

BIBLIOGRAFÍA

Libros, Informes Técnicos

- American Petrolium Institute (2007). "*Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design*" (API-RP2A-WSD). 21era Edición. Estados Unidos. 274 páginas.

- Forrest, P. (1972). *"Fatiga de los Metales"*. Editorial Ediciones URMO. España. 461 páginas.

- Karadeniz, H. (2013). *"Strochastic Analusis of Offshore Steel Structures. An Analytical Appraisal"* Editorial Springer. Londres. 408 páginas.

- Sabino, C. (1997). *"Introduccion a la metodologia de la investigacion"*. Editorial Ariel S. A. Caracas.

- Subrata K. Chakrabarti (2005). *"Handbook of Offshore Engineering"*. Editorial Elseiver. Estados Unidos. 661 páginas.

- El-Reedy, M. (2012). *"Offshore Structures. Design, Construction and Maintenance"*. Editorial Elseiver. Estados Unidos. 632 páginas.

- Tresna Dirgantara, T. (2011). *"Study Of Fatigue Design On Marine Current Turbine Support Structure. Bali – Indonesia*". Tesis Mag. University of Southampton. Faculty of Civil Engineering and Geosciences.

Sitios Web.

- Rodríguez, G. (2005). *"La participación privada en el negocio gasífero aguas arriba en Venezuela"*. Obtenida el 18 de febrero de 2014. Disponible: http://www.petroleumworldve.com/PV072405.htm

- Plazas, E. (2011). *"Definición y aspectos generales de la investigación Documental I"*. Obtenida el 5 de marzo de 2014. Disponible: http://rossettha-investigaciondocumental.blogspot.com.tr/2011/02/investigacion-documental-i.html

- Szilard Galgoul, N. (2011). *"Fatigue Analysis of Offshore Fixed and Floating Structures"*. Obtenida el 11 de abril de 2014. Disponible:

http://www.tuhh.de/sdb/vortraege/WS_2006_07/Fatigue%20Analyses%20of%20Offshore%20Structures.pdf

- Tang, L. (2010). *"Stress Concentration Factors (SCFs) for Partial Joint Penetration Plus (PJP+) welds for tubular joints"*. Obtenida el 28 de abril de 2014. Disponible: http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12122.pdf

ANEXOS

ANEXO A

CAPÍTULO 5 DE LA NORMA API RECOMMENDED PRACTICE FOR PLANNING, DESIGNING AND CONSTRUCTING FIXED OFFSHORE PLATFORMS-WORKING STRESS DESING 2A-WSD (RP 2A-WSD)

where

T_e = effective thickness, in. (mm).

T = wall thickness of chord, in. (mm).

T_p = wall thickness of inner member, in. (mm).

T_e should be used in place of T in the simple joint equations, including the γ term.

c. The Q_f calculation for both fully grouted and double-skinned joints should be based on T; it is presumed that calculation of Q_f has already accounted for load sharing between the chord and inner member, such that further consideration of the effect of grout on that term is unnecessary.

However, for fully grouted joints, Q_f may normally be set to unity, except in the instance of high β (≥ 0.9) X joints with brace tension/OPB and chord compression/OPB.

d. The minimum capacity requirements of 4.2.3 should still be observed.

4.6 INTERNALLY RING-STIFFENED JOINTS

Primary joints along launch trusses of steel jacket structures
05 are often strengthened by internal ring stiffening. Internal stiffening is also used in some structures to address fatigue requirements or to avoid very thick chord cans.

The Commentary outlines the salient features of several common approaches to the design of internally ring-stiffened joints.

4.7 CAST JOINTS

Cast joints are defined as joints formed using a casting process. They can be of any geometry and of variable wall thickness.

The design of a cast joint requires calibrated finite element analyses. An acceptable design approach for strength is to limit stresses at all locations in the joint due to nominal loads to below yielding of the material using appropriate yield criteria with a 1.6 safety factor. Such an approach can be quite conservative when compared to welded joints, which are designed on the basis of overall ultimate behavior.

Often, the manufacturer of the cast joint carries out the design process.

4.8 OTHER CIRCULAR JOINT TYPES

Joints not covered by 4.3 to 4.7 may be designed on the basis of appropriate experimental, numerical or in-service evidence. Strength-of-materials approaches may be employed although extreme care is needed in identifying *all* elements that are expected to participate in resisting incoming brace loads, and in establishing the acting load envelopes prior to conducting strength checks. Often, strength-of-materials checks are complemented with calibrated FE analyses to establish the magnitude and location of acting stresses.

4.9 DAMAGED JOINTS

Joints in existing installations could be damaged as a result of fatigue loading, corrosion or overload (environmental or accidental). In such cases, the reduced joint capacity can be estimated either by simple models (e.g., reduced area or reduced section modulus approaches), calibrated numerical (FE) models, or experimental evidence.

4.10 NON-CIRCULAR JOINTS

Connections with non-circular chord and/or brace sections are typically used on topside structures. Common types include wide flange (I beam, column, plate girder) sections and rectangular/square sections. For some arrangements, detailed land-based design practice is available. For arrangements for which little or no practice is available, the provisions noted in Section 4.8 apply.

5 Fatigue

5.1 FATIGUE DESIGN

In the design of tubular connections, due consideration should be given to fatigue action as related to local cyclic stresses.

A detailed fatigue analysis should be performed for all structures, except as provided below. It is recommended that a spectral analysis technique be used. Other rational methods may be used provided adequate representation of the forces and member responses can be demonstrated.

In lieu of detailed fatigue analysis, simplified fatigue analyses, which have been calibrated for the design wave climate, may be applied to tubular joints in Category L-3 template type platforms as defined in Section 1.7 that:

1. Are constructed of notch-tough ductile steels.
2. Have redundant, inspectable structural framing.
3. Have natural periods less than 3 seconds.

Such simplified methods are particularly useful for preliminary design of all structure categories and types, in water depths up to 400 feet (122 m). These are described in the Commentary. Caissons, monopods, and similar non-jacket structures deserve detailed analysis, with consideration of vortex shedding where applicable.

5.2 FATIGUE ANALYSIS

A detailed analysis of cumulative fatigue damage, when required, should be performed as follows:

Copyright American Petroleum Institute
Not for Resale

Provided by IHS Under License with API

5.2.1 The wave climate should be derived as the aggregate of all sea states to be expected over the long term. This may be condensed for purposes of structural analysis into representative sea states characterized by wave energy spectra and physical parameters together with a probability of occurrence.

5.2.2 A space frame analysis should be performed to obtain the structural response in terms of nominal member stress for given wave forces applied to the structure. In general, wave force calculations should follow the procedures described in Section 2.3.1. However, current may be neglected and, therefore, considerations for apparent wave period and current blockage are not required. In addition, wave kinematics factor equal to 1.0 and conductor shielding factor equal to 1.0 should be applied for fatigue waves. The drag and inertia coefficients depend on the sea state level, as parameterized by the Keulegan-Carpenter Number K (see Commentary C2.3.1b7). For small waves ($1.0 < K < 6.0$ for platform legs at mean water level), values of $C_m = 2.0$, $C_d = 0.8$ for rough members and $C_d = 0.5$ for smooth members should be used. Guidelines for considering directionality, spreading, tides and marine growth are provided in the commentary for this section.

05 A spectral analysis technique should be used to determine the stress response for each sea state. Dynamic effects should be considered for sea states having significant energy near a platform's natural period.

5.2.3 Local stresses that occur within tubular connections should be considered in terms of hot spot stresses located immediately adjacent to the joint intersection using suitable stress concentration factors. The micro scale effects occurring at the toe of the weld are reflected in the appropriate choice of the S-N curve.

5.2.4 For each location around each member intersection of interest in the structure, the stress response for each sea state should be computed, giving adequate consideration to both global and local stress effects.

The stress responses should be combined into the long term stress distribution, which should then be used to calculate the cumulative fatigue damage ratio, D, where

$$D = \sum (n/N) \qquad (5.2.4\text{-}1)$$

where

n = number of cycles applied at a given stress range.

N = number of cycles for which the given stress range would be allowed by the appropriate S-N curve.

Alternatively, the damage ratio may be computed for each sea state and combined to obtain the cumulative damage ratio.

5.2.5 In general the design fatigue life of each joint and member should not be less than the intended service life of the structure multiplied by a Safety Factor. For the design fatigue life, D, should not exceed unity.

For in-situ conditions, the safety factor for fatigue of steel components should depend on the failure consequence (i.e. criticality) and in-service inspectability. Critical elements are those whose sole failure could be catastrophic. In lieu of a more detailed safety assessment of Category L-1 structures, a safety factor of 2.0 is recommended for inspectable, non-failure critical, connections. For failure-critical and/or non-inspectable connections, increased safety factors are recommended, as shown in Table 5.2.5-1. A reduced safety factor is recommended for Category L-2 and L-3 conventional steel jacket structures on the basis of in-service performance data: SF=1.0 for redundant diver or ROV inspectable framing, with safety factors for other cases being half those in the table.

Table 5.2.5-1—Fatigue Life Safety Factors

Failure critical	Inspectable	Not Inspectable
No	2	5
Yes	5	10

05

When fatigue damage can occur due to other cyclic loadings, such as transportation, the following equation should be satisfied:

$$\sum_j SF_j D_j < 1.0 \qquad (5.2.5\text{-}1)$$

where

D_j = the fatigue damage ratio for each type of loading.

SF_j = the associated safety factor.

For transportation where long-term wave distributions are used to predict short-term damage a larger safety factor should be considered.

5.3 STRESS CONCENTRATION FACTORS

5.3.1 General

The welds at tubular joints are among the most fatigue sensitive areas in offshore platforms because of the high local stress concentrations. Fatigue lives at these locations should be estimated by evaluating the Hot Spot Stress Range (HSSR) and using it as input into the appropriate S-N curve from Section 5.5.

Copyright American Petroleum Institute
Not for Resale

Provided by IHS Under license with API

For each tubular joint configuration and each type of brace loading, the SCF is defined as:

SCF = HSSR / Nominal Brace Stress Range (5.3.1-1)

The Nominal Brace Stress Range should be based on the section properties of the brace-end under consideration, taking due account of the brace-stub, or a flared member end, if present. Likewise, the Stress Concentration Factor (SCF) evaluation shall be based on the same section dimensions. Nominal cyclic stress in the chord may also influence the HSSR and should be considered; see Commentary.

The SCF should include all stress raising effects associated with the joint geometry and type of loading, except the local (microscopic) weld notch effect, which is included in the S-N curve. SCFs may be derived from Finite Element analyses, model tests or empirical equations based on such methods. In general, the SCFs depend on the type of brace cyclic loading (i.e. brace axial load, in-plane bending, out-of plane bending), the joint type, and details of the geometry. The SCF varies around the joint, even for a single type of brace loading. When combining the contributions from the various loading modes, phase differences between them should be accounted for, with the design HSSR at each location being the range of hotspot stress resulting from the point-in-time contribution of all loading components.

For all welded tubular joints under all three types of loading, a minimum SCF of 1.5 should be used.

5.3.2 SCFs in Unstiffened Tubular Joints

For unstiffened welded tubular joints, SCFs should be evaluated using the Efthymiou equations; see Commentary.

The linearly extrapolated hot spot stress from Efthymiou may be adjusted to account for the actual weld toe position, where this systematically differs from the assumed AWS basic profiles; see Commentary.

For the purpose of computing SCF, the tubular joints are typically classified into types T/Y, X, K, and KT depending on the joint configuration, the brace under consideration and the loading pattern. As a generalization of the classification approach, the Influence Function algorithm discussed in the Commentary may be used to evaluate the hot spot stress ranges. This algorithm can handle generalized loads on the braces. Moreover the Influence Function algorithm can handle multi-planar joints for the important case of axial loading.

The Commentary contains a discussion on tubular joints welded from one side.

5.3.3 SCFs in Internally Ring-Stiffened Tubular Joints

The SCF concept also applies to internally ring stiffened joints, including the stresses in the stiffeners and the stiffener to-chord weld. Ring-stiffened joints may have stress peaks at the brace-ring intersection points. Special consideration should be given to these locations. SCFs for internally ring-stiffened joints can be determined by applying the Lloyds reduction factors to the SCFs for the equivalent unstiffened joint, see Commentary. For ring-stiffened joints analyzed by such means, the minimum SCF for the brace side under axial or OPB loading should be taken as 2.0.

Ring stiffeners without flanges on the internal rings should consider high stress that may occur at the inner edge of the ring.

5.3.4 SCFs in Grouted Joints

Grouting tends to reduce the SCF of the joint since the grout reduces the chord deformations. In general, the larger the ungrouted SCF, the greater the reduction in SCF with grouting. Hence, the reductions are typically greater for X and T joints than for Y and K joints. The Commentary discusses approaches for calculating SCFs for grouted joints.

5.3.5 SCFs in Cast Nodes

For cast joints, the SCF is derived from the maximum principal stress at any point on the surface of the casting (including the inside surface) divided by the nominal brace stress outside the casting. The SCFs for castings are not extrapolated values, but are based on directly measured or calculated values at any given point, using an analysis that is sufficiently detailed to pick up the local notch effects of fillet radii, etc. Consideration should also be given to the brace-to casting girth weld, which can be the most critical location for fatigue.

5.4 S-N CURVES FOR ALL MEMBERS AND CONNECTIONS, EXCEPT TUBULAR CONNECTIONS

Non-tubular members and connections in deck structures, appurtenances and equipment; and tubular members and attachments to them, including ring stiffeners, may be subject to variations of stress due to environmental loads or operational loads. Operational loads would include those associated with machine vibration, crane usage and filling and emptying of tanks. Where variations of stress are applied to conventional weld details, identified in ANSI/AWS D1.1-2002 Table 2.4, the associated S-N curves provided in AWS Figure 2.11 should be used, dependent on degree of redundancy. Where such variations of stress are applied to tubular nominal stress situations identified in ANSI/AWS D1.1-2002 Table 2.6, the associated S-N curves provided in AWS Figure 2.13 should be used. Stress Categories DT, ET, FT, K1, and K2, refer to tubular connections where the SCF is not known.

Copyright American Petroleum Institute
Not for Resale

Provided by IHS under license with API

Where the hot spot stress concentration factor can be determined. Sections 5.3 and 5.5 of this Recommended Practice take precedence.

For service conditions where details may be exposed to random variable loads, seawater corrosion, or submerged service with effective cathodic protection, see Commentary.

The referenced S-N curves in ANSI/AWS D1.1-2002 Figure 2.11 are Class curves. For such curves, the nominal stress range in the vicinity of the detail should be used. Due to load attraction, shell bending, etc., not present in the class type test specimens, the appropriate stress may be larger than the nominal stress in the gross member. Geometrical stress concentration and notch effects associated with the detail itself are included in the curves.

For single-sided butt welds, see Commentary.

Reference may alternatively be made to the S-N criteria similar to the OJ curves contained within ISO DIS 19902:2004 Clause 16.11. The ISO code proposal uses a weld detail classification system whereby the OJ curves include an allowance for notch stress and modest geometrical stress concentration.

5.5 S-N CURVES FOR TUBULAR CONNECTIONS 05

5.5.1 Basic S-N curves

Design S-N curves are given below for welded tubular and cast joints. The basic design S-N curve is of the form:

$$\mathrm{Log}_{10}(N) = \mathrm{Log}_{10}(k_1) - m\,\mathrm{Log}_{10}(S) \qquad (5.4.1\text{-}1)$$

where

N = the predicted number of cycles to failure under stress range S.

k_1 = a constant.

m = the inverse slope of the S-N curve.

Table 5.5.1-1 presents the basic WJ and CJ curves. These S-N curves are based on steels with yield strength less than 72 ksi (500 MPa).

For welded tubular joints exposed to random variations of stress due to environmental or operational loads, the WJ curve should be used. The brace-to-chord tubular intersection for ring-stiffened joints should be designed using the WJ curve. For cast joints the CJ curve should be used. For other details, including plated joints and, for ring-stiffened joints, the ring stiffener-to-chord connection and the ring inner edge, see 5.4.

The basic allowable cyclic stress should be corrected empirically for seawater effects, the apparent thickness effect (per 5.5.2, with exponent depending on profile), and the weld improvement factor on S per 5.5.3. An example of S-N curve construction is given in Figure 5.5-1.

Table 5.5.1-1—Basic Design S-N Curves

Curve	$\log_{10}(k_1)$ S in ksi	$\log_{10}(k_1)$ S in MPa	m
Welded Joints (WJ)	9.95	12.48	3 for $N \le 10^7$
	11.92	16.13	5 for $N > 10^7$
Cast Joints (CJ)	11.80	15.17	4 for $N \le 10^7$
	13.00	17.21	5 for $N > 10^7$ 05

The basic design S-N curves given in Table 5.5.1-1 are applicable for joints in air and submerged coated joints. For Welded Joints in seawater with adequate cathodic protection, the $m = 3$ branch of the S-N curve should be reduced by a factor of 2.0 on life, with the $m = 5$ branch remaining unchanged and the position of the slope change adjusted accordingly. Plots of the *WJ* curves versus data, and information concerning S-N curves for joints in seawater without adequate corrosion protection is given in the Commentary.

Fabrication of welded joints should be in accordance with Section 11. The curve for cast joints is only applicable to castings having an adequate fabrication inspection plan, see Commentary. 07

5.5.2 Thickness effect

The WJ curve is based on $^5/_8$-in. (16 mm) reference thickness. For material thickness above the reference thickness, the following thickness effect should be applied for as-welded joints:

$$S = S_o\,(t_{ref}/t)^{0.25} \qquad (5.5.2\text{-}1)$$

where 05

t_{ref} = the reference thickness, $^5/_8$-inch (16 mm), and

S = allowable stress range.

S_o = the allowable stress range from the S-N curve.

t = member thickness for which the fatigue life is predicted.

If the weld has profile control as defined in 11.1.3d, the exponent in the above equation may be taken as 0.20. If the weld toe has been ground or peened, the exponent in the above equation may be taken as 0.15.

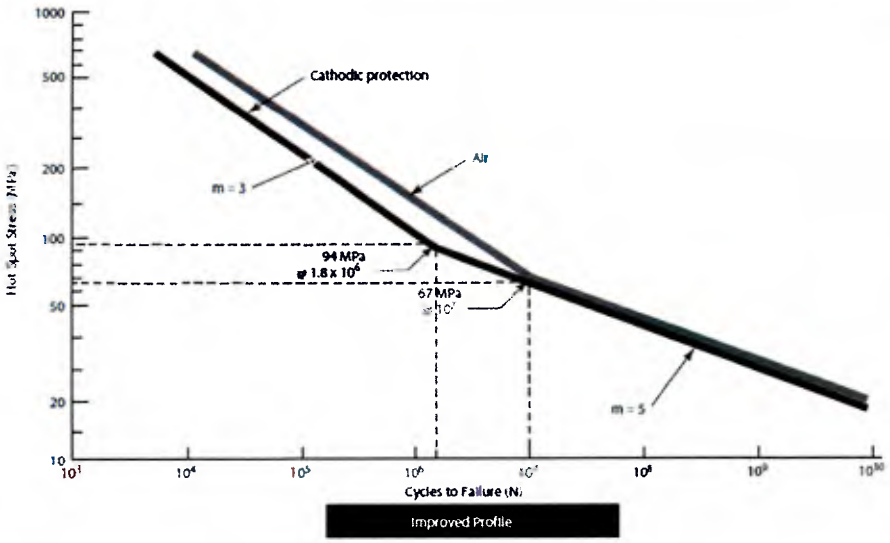
The material thickness effect for castings is given by:

$$S = S_o\,(t_{ref}/t)^{0.15} \qquad (5.5.2\text{-}2)$$

where the reference thickness t_{ref} is 1.5 in (38 mm).

Copyright American Petroleum Institute
Not for Resale

Provided by IHS under license with API



05 05

Figure 5.5-1—Example Tubular Joint S-N Curve for $T = {}^5/_8$ in. (16 mm)

No effect shall be applied to material thickness less than the reference thickness.

For any type of connection analyzed on a chord hot-spot basis, the thickness for the chord side of tubular joint should be used in the foregoing equations. For the brace side hot spot, the brace thickness may be used.

5.5.3 Weld Improvement Techniques

For welded joints, improvement factors on fatigue performance can be obtained by a number of methods, including controlled burr grinding of the weld toe, hammer peening, or as-welded profile control to produce a smooth concave profile which blends smoothly with the parent metal. Table 5.5.3-1 shows improvement factors that can be applied, provided adequate control procedures are followed. The grinding improvement factor is not applicable for joints in seawater without adequate cathodic protection. The various weld improvement techniques are discussed in the Commentary.

For welds with profile control as defined in 11.1.3d where the weld toe has been profiled, by grinding if required, to merge smoothly with the parent metal, and magnetic particle inspection demonstrates the weld toe is free of surface and near-surface defects, the improvement on fatigue performance can be considered as shown in the table, where τ is the ratio of branch/chord thickness. This improvement is in addition to the use of hotspot stress at the actual weld toe location, and the reduced size effect exponent. Either the factor on S or on N is used, but not both.

5.6 FRACTURE MECHANICS

Table 5.5.3-1—Factors on Fatigue Life for Weld Improvement Techniques

Weld Improvement Technique	Improvement Factor on S	Improvement Factor on N
Profile per 11.1.3d	[a] $\tau^{-0.1}$	varies
Weld toe burr grind	1.25	2
Hammer peening	1.56	4
[a] Chord side only.		

07

Fracture mechanics methods may be employed to quantify fatigue design lives of welded details or structural components in situations where the normal S-N fatigue assessment procedures are inappropriate. Some typical applications are to

assess the fitness-for-purpose and inspection requirements of a joint with and without known defects, or to assess the structural integrity of castings.

It is important that the fracture mechanics formulation that is used should be shown to predict, with acceptable accuracy, either the fatigue performance of a joint class with a detail similar to that under consideration, or test data for joints that are similar to those requiring assessment.

6 Foundation Design

The recommended criteria of Section 6.1 through Section 6.11 are devoted to pile foundations, and more specifically to steel cylindrical (pipe) pile foundations. The recommended criteria of Section 6.12 through Section 6.17 are devoted to shallow foundations.

6.1 GENERAL

The foundation should be designed to carry static, cyclic and transient loads without excessive deformations or vibrations in the platform. Special attention should be given to the effects of cyclic and transient loading on the strength of the supporting soils as well as on the structural response of piles. Guidance provided in Sections 6.3, 6.4, and 6.5 is based upon static, monotonic loadings. Furthermore, this guidance does not necessarily apply to so called problem soils such as carbonate material or volcanic sands or highly sensitive clays. The possibility of movement of the seafloor against the foundation members should be investigated and the forces caused by such movements, if anticipated, should be considered in the design.

6.2 PILE FOUNDATIONS

Types of pile foundations used to support offshore structures are as follows.

6.2.1 Driven Piles

Open ended piles are commonly used in foundations for offshore platforms. These piles are usually driven into the sea-floor with impact hammers which use steam, diesel fuel, or hydraulic power as the source of energy. The pile wall thickness should be adequate to resist axial and lateral loads as well as the stresses during pile driving. It is possible to predict approximately the stresses during pile driving using the principles of one-dimensional elastic stress wave transmission by carefully selecting the parameters that govern the behavior of soil, pile, cushions, capblock and hammer. For a more detailed study of these principles, refer to E.A.L. Smith's paper, "Pile Driving Analysis by the Wave Equation," Transactions ASCE, Vol. 127, 1962, Part 1, Paper No. 3306, pp. 1145–1193. The above approach may also be used to optimize the pile hammer cushion and capblock with the aid of computer analyses (commonly known as the Wave Equation Analyses). The design penetration of driven piles should be determined in accordance with the principles outlined in Sections 6.3 through 6.7 and 6.9 rather than upon any correlation of pile capacity with the number of blows required to drive the pile a certain distance into the seafloor.

When a pile refuses before it reaches design penetration, one or more of the following actions can be taken.

a. Review of hammer performance. A review of all aspects of hammer performance, possibly with the aid of hammer and pile head instrumentation, may identify problems which can be solved by improved hammer operation and maintenance, or by the use of a more powerful hammer.

b. Reevaluation of design penetration. Reconsideration of loads, deformations and required capacities, of both individual piles and other foundation elements, and the foundation as a whole, may identify reserve capacity available. An interpretation of driving records in conjunction with instrumentation mentioned above may allow design soil parameters or stratification to be revised and pile capacity to be increased.

c. Modifications to piling procedures, usually the last course of action, may include one of the following:

- **Plug Removal.** The soil plug inside the pile is removed by jetting and air lifting or by drilling to reduce pile driving resistance. If plug removal results in inadequate pile capacities, the removed soil plug should be replaced by a gravel grout or concrete plug having sufficient load-carrying capacity to replace that of the removed soil plug. Attention should be paid to plug/pile load transfer characteristics. Plug removal may not be effective in some circumstances particularly in cohesive soils.
- **Soil Removal Below Pile Tip.** Soil below the pile tip is removed either by drilling an undersized hole or jetting equipment is lowered through the pile which acts as the casing pipe for the operation. The effect on pile capacity of drilling an undersized hole is unpredictable unless there has been previous experience under similar conditions. Jetting below the pile tip should in general be avoided because of the unpredictability of the results.
- **Two-State Driven Piles.** A first stage or outer pile is driven to a predetermined depth, the soil plug is removed, and a second stage or inner pile is driven inside the first stage pile. The annulus between the two piles is grouted to permit load transfer and develop composite action.
- Drilled and grouted insert piles as described in 6.2.3(b) below.

ANEXO B

EJERCICIO PARA EL ENTRENAMIENTO DEL SOFTWARE SACS

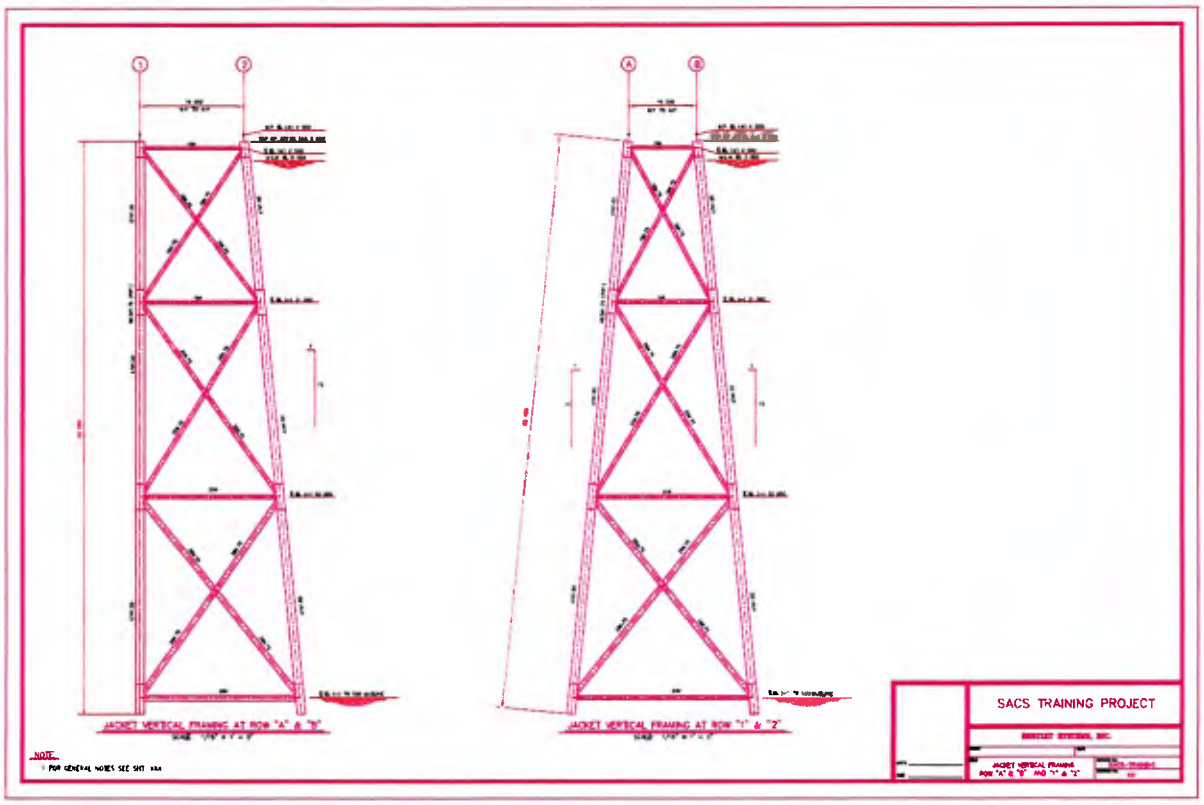


Figura B.1. Vista de perfil del jacket

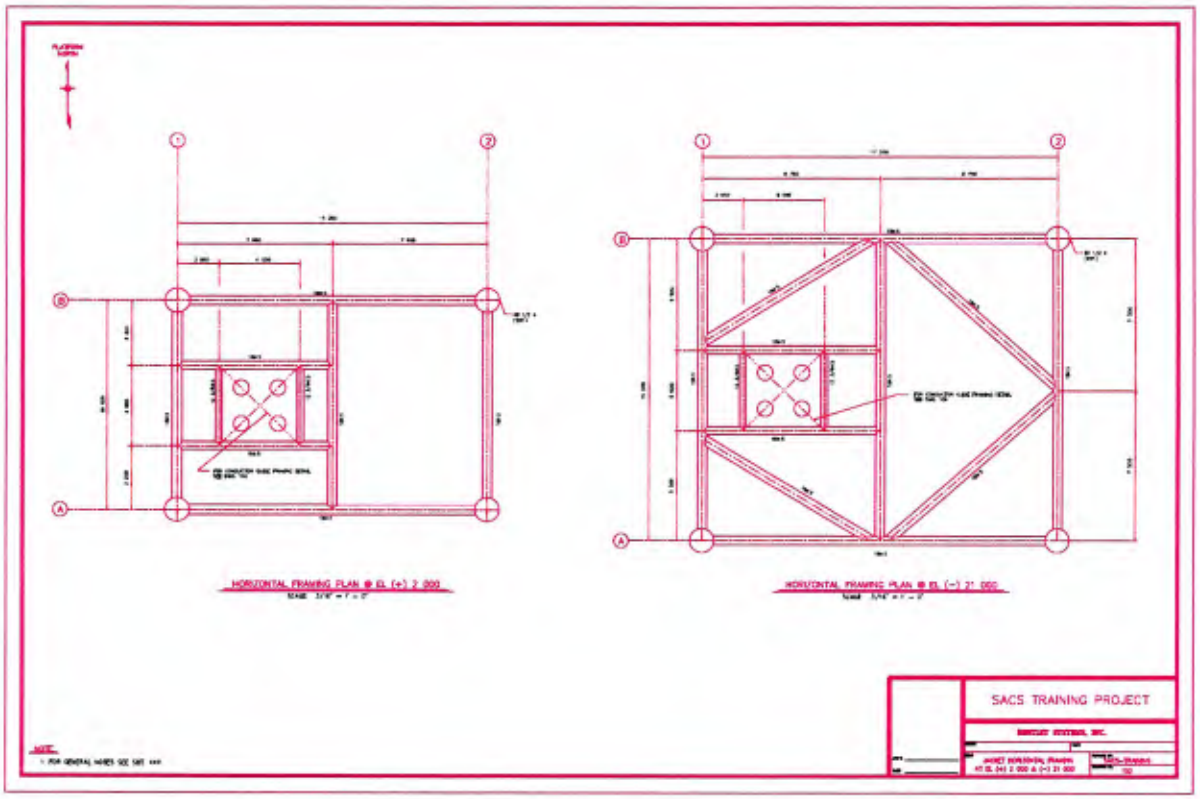


Figura B.2. Vista de planta a 2 metros del nivel del mar y -21 metros del nivel mar.

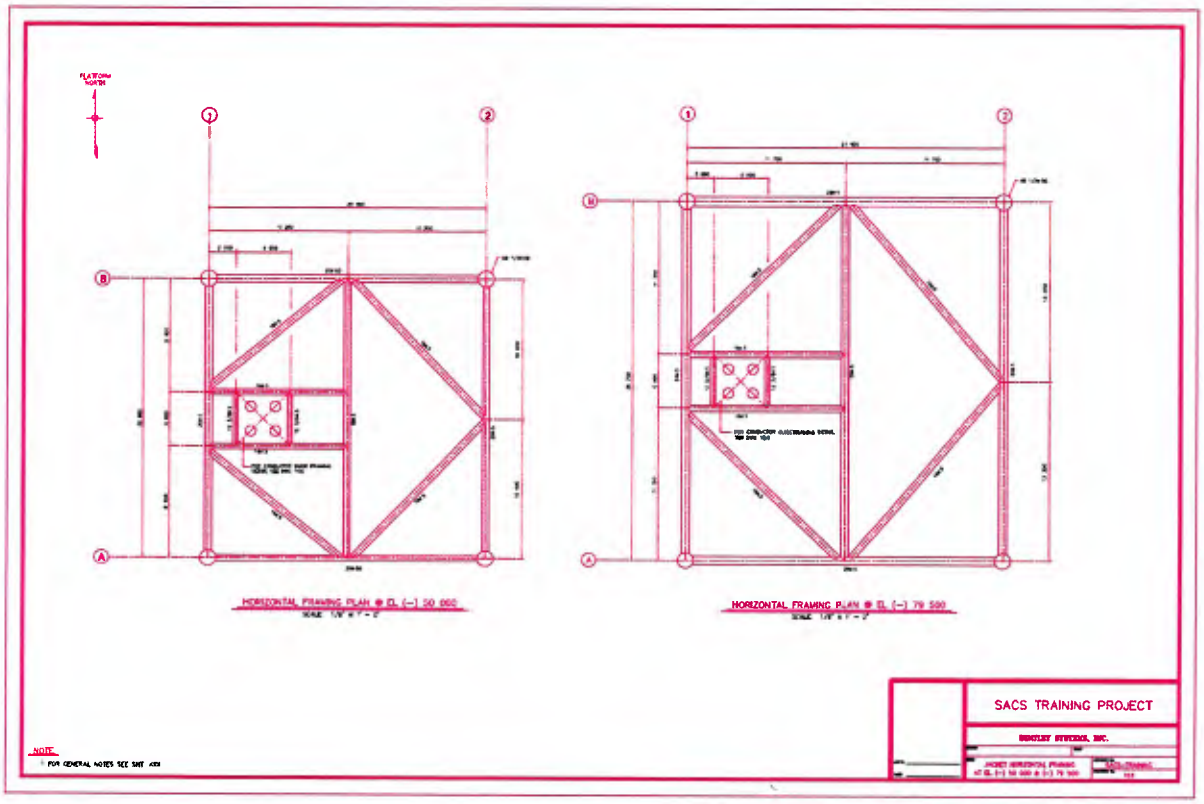


Figura B.3. Vista planta a -50 metros del nivel del mar y -79.5 metros del nivel del mar.

*Required data before start SACS

Environmental loads:

- Still Water Depth: 79.5m
- High Tide: 1.5m
- Marine growth:

Distance from Mudline (m)	Thickness (cm)	Dry density (T/m³)
0-60	2.5	1.4
60-79.5	5.0	1.4

- Current:

Distance from Mudline (m)	Velocity (m/s)	
	1 Year	100 Years
Bottom	0.514	0.514
Surface	1.029	1.081

- Wind:

Velocity at 10m (m/s)	
1 Year	100 Years
25.72	45.17

- Wave:

Wave Height (m)	Period (sec)	Wave Height (m)	Period (sec)
1 Year		100 Years	
6.10	12.00	12.19	15.0

Dr. Mohamed A. I
Email:elreedyma

- Wave Scat diagram:

Table 1: 0.0 direction

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.15	0.10	0.10
2.0 - 4.0	0.10	0.19	0.11
4.0 - 6.0	0.05	0.08	0.05
6.0 - 10.0	0.02	0.03	0.02

Table 2: 45.0 direction

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.10	0.13	0.08
2.0 - 4.0	0.15	0.13	0.10
4.0 - 6.0	0.08	0.08	0.07
6.0 - 10.0	0.04	0.02	0.03

Table 3: 90.0 degree

Dominant Period (SECS)	Significant Wave Height (M)		
	0.0 - 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.6
1.0 - 2.0	0.13	0.10	0.08
2.0 - 4.0	0.13	0.15	0.10
4.0 - 6.0	0.06	0.09	0.08
6.0 - 10.0	0.03	0.04	0.02

Dr. Mohamed
Email:elreedy

Figura B.4: Datos ambientales y diagrama de dispersión del ejercicio

ANEXO C

RESULTADOS DEL ANALISIS ESPECTRAL DE FATIGA POR ORDEN DE DAÑO OBTENIDOS DEL PROGRAMA SACS VERSION 5.3

SACS Release 5.3 admin
PROYECTO FATIGA DATE 07-MAY-2014 TIME 22:07:28 FTG PAGE 51

* * * M E M B E R F A T I G U E R E P O R T * * *
(DAMAGE ORDER)

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
401L	401L-103X	BR6	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.06	20.62	2.66	2.61	2.68	2.05	1.345399	T	14.86548		
401L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.49	2.58	1.60	1.81	.8594870	T	23.26970		
401L	401L-303X	BR6	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.06	32.18	2.58	2.45	2.71	1.89	.2199301	T	90.93799		
401L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.46	2.43	1.60	1.73	.2117343	L	94.45799		
401L	401L-4402	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.06	32.18	3.25	4.12	2.21	3.45	.2848374	TL	70.21549		
401L	401L-501L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.49	3.18	1.60	2.45	.2155777	TL	92.77396		
401L	4401-401L	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.06	20.62	3.16	4.08	2.21	3.53	.1412549	T	141.5881		
401L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.39	3.12	1.60	2.51	.1003975	T	199.2081		
403L	403L-303X	BR5	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.06	32.18	2.60	2.45	2.71	1.87	.1672510	T	119.5807		
403L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.46	2.43	1.60	1.72	.1974480	R	101.2925		
403L	403L-203X	BR6	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.06	20.62	2.68	2.62	2.68	2.03	1.323821	T	15.10778		
403L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.50	2.59	1.60	1.79	.8454832	T	23.65511		
403L	403L-4400	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.06	20.62	3.07	4.30	2.21	3.50	.1404934	T	142.3555		
403L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.26	3.24	1.60	2.49	.0998454	T	200.3097		
403L	4403-403L	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.06	32.18	3.16	4.28	2.21	3.44	.2786919	TR	71.76385		
403L	403L-503L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.06		2.38	3.26	1.60	2.44	.2114692	TR	94.57643		
402L	402L-103X	BR5	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.12	22.88	2.71	2.76	2.66	2.15	1.148959	T	17.40706		
402L	302L-402L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.55	2.74	1.60	1.90	.7859923	T	25.44554		
402L	402L-403X	BR6	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.12	32.49	2.61	2.45	2.72	1.86	.9999229	T	20.00154		
402L	302L-402L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.46	2.43	1.60	1.71	.5628911	T	35.53085		
402L	402L-4401	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.12	22.88	3.07	4.25	2.21	3.49	.2003260	T	99.83727		
402L	402L-502L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.27	3.20	1.60	2.48	.1503429	T	133.0293		
402L	404L-402L	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.12	32.49	3.16	4.30	2.21	3.44	1.088513	BR	18.37368		
402L	402L-502L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.37	3.27	1.60	2.44	.8120392	BR	24.62935		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
404L	404L-203X	BR5	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.12	22.88	2.69	2.73	2.66	2.18	1.137501	T	17.58240		
404L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.54	2.71	1.60	1.92	.7766167	T	25.75273		
404L	404L-403X	BR5	TUB	45.72	1.905	K	BRC	12.12	32.49	2.59	2.44	2.72	1.87	.9927875	T	20.14530		
404L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.46	2.42	1.60	1.72	.5698615	T	35.09624		
404L	404L-402L	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.12	32.49	3.26	4.11	2.21	3.45	1.137008	TR	17.59003		
404L	404L-504L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.51	3.17	1.60	2.45	.8591946	TR	23.27761		
404L	4400-404L	H41	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.12	22.88	3.17	4.01	2.21	3.52	.1997305	T	100.1349		
404L	404L-504L	LG4	TUB	123.19	4.445	K	CHD	12.12		2.40	3.06	1.60	2.50	.1499807	T	133.3505		
104L	104L-201X	BR2	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.79	5.01	2.62	2.26	2.78	2.57	.62242-3	TR	32132.55		
104L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		2.73	2.61	1.60	2.55	.19949-2	TR	10025.45		
104L	104L-401X	BR2	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.79	5.01	3.18	2.58	2.78	2.28	.46798-3	T	42736.78		
104L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.31	3.13	1.60	2.26	.14611-2	T	13688.22		
104L	104L-1102	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.79	5.01	3.09	4.27	2.24	4.41	1.097921	L	18.21624		
104L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.23	3.41	1.60	3.52	1.103345	L	18.12669		
104L	1100-104L	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.79	5.01	3.06	4.12	2.24	4.44	.0168002	R	1190.465		
104L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.16	3.32	1.6D	3.54	.0268264	8R	745.5344		
102L	102L-401X	BR1	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.79	5.01	3.48	2.75	2.78	2.11	.68256-3	T	29301.56		
102L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.62	3.40	1.60	2.09	.21280-2	T	9398.482		
102L	102L-101X	BR2	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.79	5.01	2.86	2.39	2.78	2.42	.62643-3	TL	31926.92		
102L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		2.98	2.82	1.60	2.40	.20179-2	TL	9911.211		
102L	102L-1101	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.79	5.01	3.04	4.01	2.24	4.46	.0138930	BL	1439.579		
102L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.11	3.26	1.60	3.56	.0244387	BL	818.3752		
102L	1102-102L	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.79	5.01	3.11	4.41	2.24	4.39	1.094379	R	18.27520		
102L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.79		3.30	3.49	1.60	3.50	1.099651	R	18.18759		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED DD (CM)	REQUIRED WT (CM)
103L	103L-201X	BR1	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.65	4.99	3.54	2.91	2.75	2.20	.0386098	T	518.0031		
103L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.74	3.63	1.60	2.18	.1400097	TL	142.8472		
103L	103L-301X	BR2	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.65	5.00	3.55	2.80	2.78	2.87	.46653-3	T	42870.04		
103L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.70	3.48	1.60	2.05	.14319-2	T	13967.42		
103L	103L-1100	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.65	4.99	3.19	4.83	2.24	4.34	.0438800	R	455.7881		
103L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.49	3.74	1.60	3.46	.0597450	TR	334.7558		
103L	1104-103L	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.65	5.00	3.10	4.75	2.24	4.32	.8060875	R	24.81120		
103L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.45	3.70	1.60	3.44	.7988457	R	25.03612		
101L	101L-101X	BR1	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.65	4.99	3.50	2.88	2.75	2.22	.0386024	T	510.1031		
101L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.70	3.60	1.60	2.20	.1399532	TR	142.9050		
101L	101L-301X	BR1	TUB	71.12	1.905	K	BRC	29.65	5.00	3.26	2.64	2.78	2.24	.34393-3	T	58151.30		
101L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.40	3.22	1.60	2.22	.10477-2	T	19089.07		
101L	101L-1103	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.65	5.00	3.15	4.62	2.24	4.34	.8026405	L	24.91776		
101L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.38	3.62	1.60	3.46	.7953178	L	25.14718		
101L	1101-101L	H11	TUB	71.12	1.270	K	BRC	29.65	4.99	3.18	4.78	2.24	4.35	.0437696	L	456.9378		
101L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	K	CHD	29.65		3.47	3.71	1.60	3.46	.0595336	TL	335.9449		
102X	202L-102X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.88		2.33	2.83	2.54	1.64	.0297930	R	671.2976		
102X	201L-102X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.88		2.77	4.44	3.12	2.58	.2808931	R	71.20148		
102X	301L-102X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.88		2.32	2.83	2.54	1.63	.0251454	L	795.3727		
102X	302L-102X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.88		2.76	4.44	3.12	2.57	.2403066	L	83.22703		
202X	204L-202X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.88		2.34	2.84	2.54	1.64	.0295945	L	675.8004		
202X	203L-202X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.88		2.78	4.44	3.12	2.59	.2790144	L	71.68089		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
202X	303L-202X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.88		2.34	2.83	2.54	1.64	.0248912	R	803.4971		
202X	304L-202X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.88		2.78	4.44	3.12	2.59	.2378619	R	84.08241		
103X	302L-103X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	12.78		2.50	2.81	2.48	1.70	.0521255	B	383.6891		
103X	301L-103X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	12.78		2.65	4.23	3.08	2.53	.2062304	BR	96.97892		
103X	401L-103X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	12.78		2.47	2.80	2.48	1.68	.0570584	TR	350.5180		
103X	402L-103X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	12.78		2.62	4.22	3.08	2.50	.2422474	R	82.56021		
203X	304L-203X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	12.78		2.56	2.82	2.48	1.76	.0510472	B	391.7939		
203X	303L-203X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	12.78		2.71	4.24	3.08	2.60	.2020921	BL	98.96476		
203X	403L-203X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	12.78		2.53	2.81	2.48	1.73	.0557173	TL	358.9547		
203X	404L-203X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	12.78		2.68	4.23	3.08	2.56	.2361434	L	84.69432		
604L	604L-704L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2182259	B	91.64813		
604L	504L-604L	PL5	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2187421	BL	91.43187		
602L	602L-702L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2152948	B	92.89588		
602L	502L-602L	PL5	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2157441	TL	92.70244		
401P	301P-401P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2137409	B	93.57121		
401P	401P-501L	PL4	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2137409	B	93.57121		
403P	303P-403P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2120707	T	94.30816		
403P	403P-503L	PL4	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2120707	T	94.30815		
603L	603L-703L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2110833	T	94.74933		
603L	503L-603L	PL5	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2081552	T	96.08216		
601L	601L-701L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2080145	T	96.14713		
601L	501L-601L	PL5	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.2051193	B	97.50422		
404P	304P-404P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.1975234	BL	101.2538		
404P	404P-504L	PL4	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.1975234	BL	101.2538		
402P	302P-402P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.1970349	TL	101.5049		
402P	402P-502L	PL4	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.1970350	TL	101.5048		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SUC LIFE	REQUIRED OD (CM)	WT (CM)
301L	301L-102X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	8RC	26.13	50.04	2.45	2.37	2.75	2.08	.0171643	B	1165.209		
301L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.48	2.43	1.60	1.88	.0414967	B	481.9656		
301L	301L-302X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	26.13	78.51	2.69	2.64	2.71	2.25	.42982-2	L	4653.144		
301L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.82	2.80	1.60	2.03	.0119660	L	1671.405		
301L	301L-103X	BR5	TUB	45.72	1.905	TK	8RC	26.13	50.04	2.32	2.25	2.73	1.83	.1272843	B	157.1285		
301L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.28	2.23	1.60	1.70	.1317074	B	151.8518		
301L	301L-303X	8R5	TUB	45.72	1.905	TK	BRC	26.13	78.51	1.90	1.79	2.93	1.60	.59223-2	8	3377.082		
301L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		1.86	1.75	1.60	1.60	.80858-2	R	2473.486		
301L	301L-3303	H31	TUB	45.72	1.270	TK	8RC	26.13	78.51	3.69	3.90	2.21	3.54	.0356971	TR	560.2698		
301L	301L-401L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		3.08	3.18	1.60	2.51	.0525206	TR	380.8031		
301L	3301-301L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	26.13	50.04	3.52	3.75	2.21	3.59	.15116-2	R	13231.29		
301L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.88	2.99	1.60	2.54	.15901-2	R	12578.07		
403X	304L-403X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	11.86		2.53	2.38	2.55	1.69	.0412906	B	484.3712		
403X	302L-403X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	11.86		2.96	3.52	2.85	2.19	.0882433	B	226.6460		
403X	402L-403X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	11.86		2.50	2.38	2.55	1.67	.0490220	T	407.9802		
403X	404L-403X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	11.86		2.93	3.51	2.85	2.16	.1294785	TR	154.4659		
303L	303L-302X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	26.13	78.52	2.70	2.65	2.71	2.20	.36674-2	R	5453.381		
303L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.83	2.82	1.60	1.98	.0100812	R	1983.883		
303L	303L-202X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	8RC	26.13	50.04	2.46	2.37	2.75	2.04	.0170243	B	1174.791		
303L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.48	2.43	1.60	1.85	.0411522	B	486.0005		
303L	303L-203X	BR5	TUB	45.72	1.905	TK	BRC	26.13	50.04	2.32	2.26	2.73	1.85	.1253057	B	159.6096		
303L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.29	2.24	1.60	1.71	.1294568	B	154.4917		
303L	303L-303X	BR6	TUB	45.72	1.905	TK	BRC	26.13	78.52	1.89	1.79	2.93	1.60	.85674-2	B	2334.421		
303L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		1.86	1.77	1.60	1.60	.87955-2	L	2273.898		
303L	303L-3300	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	26.13	50.04	3.53	3.73	2.21	3.57	.17102-2	L	11694.69		
303L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		2.89	2.99	1.60	2.54	.17869-2	L	11192.63		
303L	3304-303L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	26.13	78.52	3.75	4.02	2.21	3.49	.0367599	TL	544.0713		
303L	303L-403L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.13		3.16	3.29	1.60	2.47	.0538053	TL	371.7105		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	WT (CM)
304L	304L-202X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	26.26	51.15	2.57	2.51	2.72	2.17	.0202487	B	987.7165		
304L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		2.63	2.60	1.60	1.96	.0550482	BR	363.3180		
304L	304L-402X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	26.26	79.23	2.67	2.63	2.72	2.22	.39121-2	L	5112.283		
304L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		2.80	2.79	1.60	2.01	.0113572	L	1760.992		
304L	304L-203X	BR6	TUB	45.72	1.905	TK	BRC	26.26	51.15	2.24	2.17	2.76	1.76	.1014679	B	197.1068		
304L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		2.22	2.16	1.60	1.67	.1024761	B	195.1674		
304L	304L-403X	BR6	TUB	45.72	1.905	TK	BRC	26.26	79.23	1.90	1.78	2.94	1.60	.0465274	B	429.8542		
304L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		1.86	1.75	1.60	1.60	.0313579	B	637.7973		
304L	304L-3302	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	26.26	79.23	3.69	3.92	2.21	3.54	.03BB323	L	515.0350		
304L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		3.08	3.19	1.60	2.51	.0561768	L	356.0190		
304L	3300-304L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	26.26	51.15	3.51	3.72	2.21	3.58	.45013-2	R	4443.155		
304L	304L-404L	LG3	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	26.26		2.88	2.98	1.60	2.54	.45690-2	R	4377.329		
204L	204L-201X	BR1	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.54	31.1B	2.55	2.54	2.68	2.94	.0263298	T	759.5948		
204L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.97	3.00	1.60	2.92	.0964464	TR	207.3691		
204L	204L-401X	BR1	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.54	42.12	2.82	2.86	2.64	3.28	.16439-2	TL	12165.83		
204L	104L-204L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		3.35	3.42	1.60	3.25	.61588-2	TL	3247.400		
204L	204L-202X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.54	31.18	2.14	2.09	2.84	1.91	.72881-2	R	2744.184		
204L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.25	2.21	1.60	1.75	.0277299	R	721.2429		
204L	204L-402X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.54	42.12	2.02	1.95	2.91	1.84	.20730-2	R	9648.049		
204L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.15	2.09	1.60	1.76	.54113-2	R	3695.992		
204L	204L-2202	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.54	42.12	3.46	3.51	2.24	4.32	.57472-2	R	3479.926		
204L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.92	2.94	1.60	3.14	.82648-2	R	2419.905		
204L	2200-204L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.54	31.18	3.32	3.37	2.24	4.33	.12538-2	TR	15951.47		
204L	204L-304L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.76	2.78	1.60	3.14	.11161-2	TR	17919.15		
202L	202L-101X	BR1	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.54	31.18	2.56	2.55	2.68	2.90	.0263175	T	759.9506		
202L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.99	3.03	1.60	2.87	.0962873	TL	207.7117		
202L	202L-401X	BR2	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.54	42.13	2.84	2.87	2.64	3.24	.16442-2	TR	12163.80		
202L	102L-202L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		3.38	3.45	1.60	3.22	.63882-2	R	3130.780		
202L	202L-402X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.54	42.13	2.04	1.95	2.91	1.84	.20370-2	L	9818.360		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
202L	202L-302L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.16	2.08	1.60	1.75	.54943-2	L	3640.104		
202L	202L-102X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.54	31.18	2.14	2.09	2.84	1.91	.73292-2	BL	2728.826		
202L	202L-302L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.25	2.21	1.60	1.75	.0278888	L	717.1342		
202L	202L-2201	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.54	31.18	3.37	3.42	2.24	4.22	.12302-2	TL	16256.94		
202L	202L-302L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.81	2.83	1.60	3.06	.10894-2	TL	18359.39		
202L	2202-202L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.54	42.13	3.51	3.56	2.24	4.23	.56781-2	L	3522.292		
202L	202L-302L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.54		2.98	3.00	1.60	3.07	.81676-2	L	2448.712		
101X	102L-101X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	16.89		1.96	3.88	2.66	2.01	.0136386	L	1466.421		
101X	101L-101X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	16.89		3.00	5.00	3.59	3.85	.0519341	L	385.1033		
101X	201L-101X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	16.89		1.96	3.87	2.66	2.01	.0153351	L	1304.197		
101X	202L-101X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	16.89		3.00	5.00	3.59	3.85	.0617083	L	324.1055		
201X	104L-201X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	16.89		1.96	3.88	2.66	2.02	.0135730	R	1473.513		
201X	103L-201X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	16.89		3.00	5.00	3.59	3.85	.0516377	R	387.3138		
201X	203L-201X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	16.89		1.97	3.88	2.66	2.03	.0152787	R	1309.016		
201X	204L-201X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	16.89		3.01	5.00	3.59	3.85	.0614609	R	325.4099		
4402	4402-4407	H42	TUB	40.64	1.270	T	BRC	3.29		2.67	5.00	2.87	5.00	.0437205	R	457.4517		
4402	401L-4402	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	3.29		5.00	5.00	4.04	5.00	.0437205	R	457.4517		
4403	4403-4406	H42	TUB	40.64	1.270	T	BRC	3.29		2.67	5.00	2.87	5.00	.0428884	R	466.3262		
4403	4402-4403	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	3.29		5.00	5.00	4.04	5.00	.0428884	R	466.3262		
303X	303L-303X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	11.81		2.51	2.39	2.55	1.68	.79859-2	B	2504.406		
303X	301L-303X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	11.81		2.94	3.53	2.86	2.19	.0242742	R	823.9205		
303X	401L-303X	BR6	TUB	45.72	1.905	Y	BRC	11.81		2.45	2.37	2.55	1.65	.0118807	T	1683.398		
303X	403L-303X	BR5	TUB	45.72	1.905	Y	CHD	11.81		2.89	3.52	2.86	2.12	.0375992	TR	531.9256		
201L	201L-101X	BR2	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.40	32.83	2.49	2.45	2.71	2.74	.91442-2	T	2187.178		
201L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.87	2.89	1.60	2.72	.0282943	TR	706.8550		
201L	201L-301X	BR2	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.40	41.76	2.79	2.83	2.64	3.31	.16291-2	TL	12276.83		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
201L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		3.30	3.37	1.60	3.28	.72984-2	L	2740.344		
201L	201L-102X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.40	32.83	2.22	2.16	2.81	1.98	.87567-2	TR	2283.961		
201L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.32	2.28	1.60	1.80	.0315825	R	633.2624		
201L	201L-302X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.40	41.76	2.03	1.96	2.91	1.84	.18982-2	R	10536.12		
201L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.15	2.10	1.60	1.76	.48197-2	R	4149.666		
201L	201L-2203	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.40	41.76	3.37	3.43	2.24	4.46	.0219292	R	912.0256		
201L	201L-301L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.82	2.84	1.60	3.24	.0279531	R	715.4834		
201L	2201-201L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.40	32.83	3.43	3.52	2.24	4.08	.11298-2	TR	17701.53		
201L	101L-201L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.89	2.92	1.60	2.96	.10604-2	TR	18860.48		
203L	203L-301X	BR1	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.40	41.76	2.82	2.85	2.64	3.26	.15417-2	R	12972.30		
203L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		3.35	3.41	1.60	3.23	.70044-2	R	2855.347		
203L	203L-201X	BR2	TUB	71.12	1.905	TK	BRC	29.40	32.84	2.47	2.43	2.71	2.73	.91490-2	T	2186.025		
203L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.85	2.88	1.60	2.70	.0282395	TL	708.2285		
203L	203L-202X	BR3	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.40	32.84	2.21	2.16	2.81	2.01	.87219-2	TL	2293.069		
203L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.31	2.27	1.60	1.83	.0313806	L	637.3356		
203L	203L-302X	BR4	TUB	50.80	1.905	TK	BRC	29.40	41.76	2.02	1.95	2.91	1.85	.21066-2	L	9494.168		
203L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.14	2.09	1.60	1.76	.54027-2	L	3701.880		
203L	203L-2200	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.40	32.84	3.48	3.56	2.24	3.97	.11730-2	TL	17050.64		
203L	103L-203L	LG1	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.94	2.97	1.60	2.89	.11186-2	TL	17879.08		
203L	2204-203L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	29.40	41.76	3.49	3.56	2.24	4.23	.0222051	L	900.6954		
203L	203L-303L	LG2	TUB	123.19	4.445	TK	CHD	29.40		2.96	2.99	1.60	3.07	.0282886	L	706.9990		
3309	3309-3310	H33	TUB	32.38	1.270	T	BRC	3.26		2.91	5.00	2.94	5.00	.58388-2	B	3425.374		
3309	3307-3309	H32	TUB	40.64	1.270	T	CHD	3.26		5.00	5.00	4.12	5.00	.0313395	B	638.1723		
3310	3309-3310	H33	TUB	32.38	1.270	T	BRC	3.26		2.91	5.00	2.94	5.00	.58195-2	T	3436.728		
3310	3308-3310	H32	TUB	40.64	1.270	T	CHD	3.26		5.00	5.00	4.12	5.00	.0312393	T	640.2198		
701L	601L-701L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0308742	B	647.7894		
701L	701L-801L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.80594-5	TR	2481583.		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
704L	604L-704L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0305712	T	654.2098		
704L	704L-804L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.38206-5	B	5234810.		
702L	602L-702L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0304828	T	656.1085		
702L	702L-802L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.47692-5	B	4193578.		
703L	603L-703L	DL6	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0290317	B	688.9017		
703L	703L-803L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.73469-5	TL	2722243.		
4400	4400-4405	H41	TUB	45.72	1.270	T	BRC	6.98		5.00	4.77	2.64	5.00	.0117789	TR	1697.948		
4400	403L-4400	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	6.98		5.00	5.00	3.66	5.00	.0241438	TR	828.3697		
4401	4404-4401	H41	TUB	45.72	1.270	T	BRC	6.98		5.00	4.77	2.64	5.00	.0111357	BR	1796.027		
4401	402L-4401	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	6.98		5.00	5.00	3.66	5.00	.0230823	BR	866.4635		
804L	704L-804L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0189838	T	1057.987		
301P	201P-301P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0183451	T	1090.211		
301P	301P-401P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0183451	T	1090.211		
303P	203P-303P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0178417	B	1120.968		
303P	303P-403P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0178417	B	1120.968		
304P	204P-304P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0177143	TR	1129.030		
304P	304P-404P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0177143	TR	1129.030		
302P	202P-302P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0172416	BR	1159.987		
302P	302P-402P	PL3	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0172416	BR	1159.987		
802L	702L-802L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0169533	T	1179.708		
201P	101P-201P	PL1	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0168307	T	1188.307		
201P	201P-301P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0168307	T	1188.307		
203P	103P-203P	PL1	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0164310	B	1217.210		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SUC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
203P	203P-303P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0164310	B	1217.210		
402X	204L-402X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.89		2.33	2.73	2.55	1.63	.17786-2	L	11244.62		
402X	202L-402X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.89		2.83	4.26	3.07	2.49	.0163693	L	1221.802		
402X	302L-402X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.89		2.32	2.72	2.55	1.62	.16371-2	L	12216.50		
402X	304L-402X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.89		2.82	4.26	3.07	2.48	.0151800	L	1317.524		
3308	3307-3308	H33	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.89		2.71	5.00	2.94	5.00	.29828-2	B	6705.166		
3308	3303-3308	H32	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.89		5.00	5.00	4.12	5.00	.0160274	B	1247.864		
3307	3307-3308	H33	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.89		2.71	5.00	2.94	5.00	.29501-2	T	6779.517		
3307	3304-3307	H32	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.89		5.00	5.00	4.12	5.00	.0158520	T	1261.671		
204P	104P-204P	PL1	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0143276	TR	1395.904		
204P	204P-304P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0143276	TR	1395.904		
202P	102P-202P	PL1	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0138730	BR	1441.653		
202P	202P-302P	PL2	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0138730	BR	1441.653		
302X	203L-302X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.83		2.33	2.74	2.55	1.64	.13968-2	R	14318.08		
302X	201L-302X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.83		2.83	4.28	3.07	2.50	.8128517	R	1556.220		
302X	301L-302X	BR4	TUB	50.80	1.905	Y	BRC	15.83		2.32	2.74	2.55	1.63	.14634-2	R	13666.77		
302X	303L-302X	BR3	TUB	50.80	1.905	Y	CHD	15.83		2.82	4.28	3.07	2.49	.0135216	R	1479.119		
803L	703L-803L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.0112798	B	1773.086		
801L	701L-801L	DL7	TUB	106.68	3.810					1.60	1.60	1.60	1.60	.81828-2	B	2444.387		
401X	104L-401X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	17.87		1.98	4.04	2.66	2.10	.10132-2	L	19740.05		
401X	102L-401X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	17.87		2.95	5.00	3.64	3.99	.33065-2	L	6048.663		
401X	202L-401X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	17.87		1.97	4.04	2.66	2.10	.11380-2	L	17575.27		
401X	204L-401X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	17.87		2.95	5.00	3.64	3.99	.40991-2	L	4879.124		
301X	103L-301X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	17.82		1.97	4.04	2.66	2.10	.67339-3	R	29700.66		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SUC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
301X	101L-301X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	17.82		2.95	5.00	3.64	3.99	.23238-2	R	8606.432		
301X	201L-301X	BR2	TUB	71.12	1.905	Y	BRC	17.82		1.97	4.04	2.66	2.09	.88026-3	R	22720.66		
301X	203L-301X	BR1	TUB	71.12	1.905	Y	CHD	17.82		2.94	5.00	3.65	3.99	.35113-2	R	5695.867		
4407	4406-4407	H43	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.89		2.71	5.00	2.94	5.00	.47457-3	B	42143.17		
4407	4402-4407	H42	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.89		5.00	5.00	4.12	5.00	.25833-2	B	7742.178		
4406	4406-4407	H43	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.89		2.71	5.00	2.94	5.00	.39130-3	T	51111.36		
4406	4403-4406	H42	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.89		5.00	5.00	4.12	5.00	.21282-2	T	9397.532		
1110	1109-1110	H14	TUB	32.38	1.270	T	BRC	4.71		3.15	5.00	3.22	5.00	.22700-3	B	88104.10		
1110	1108-1110	H13	TUB	45.72	1.270	T	CHD	4.71		5.00	5.00	4.59	5.00	.13392-2	B	14934.31		
1109	1109-1110	H14	TUB	32.38	1.270	T	BRC	4.71		3.15	5.00	3.22	5.00	.22418-3	T	89213.01		
1109	1107-1109	H13	TUB	45.72	1.270	T	CHD	4.71		5.00	5.00	4.59	5.00	.13225-2	T	15123.00		
3303	3301-3303	H31	TUB	45.72	1.270	K	BRC	4.44	5.26	3.34	3.36	2.66	4.86	.18072-4	T	1106665.		
3303	301L-3303	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	4.44		5.00	5.00	3.27	5.00	.87918-4	T	227484.2		
3303	3303-3308	H32	TUB	40.64	1.270	K	BRC	4.44	5.26	4.21	4.61	2.87	5.00	.29193-3	B	68509.67		
3303	301L-3303	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	4.44		5.00	5.00	4.04	5.00	.12434-2	B	16084.59		
4408	4408-4409	H43	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.69		2.60	5.00	2.94	5.00	.22640-3	B	88339.21		
4408	4406-4408	H42	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.69		5.00	5.00	4.12	5.00	.12156-2	B	16452.45		
4409	4408-4409	H43	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.69		2.60	5.00	2.94	5.00	.21748-3	T	91963.25		
4409	4407-4409	H42	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.69		5.00	5.00	4.12	5.00	.11680-2	T	17122.99		
3304	3304-3308	H31	TUB	45.72	1.270	K	BRC	4.44	5.26	3.34	3.36	2.66	4.85	.18985-4	T	1053442.		
3304	3304-303L	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	4.44		5.00	5.00	3.27	5.00	.93404-4	T	214123.2		
3304	3304-3307	H32	TUB	40.64	1.270	K	BRC	4.44	5.26	4.21	4.61	2.87	5.00	.25416-3	T	78690.86		
3304	3303-3304	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	4.44		5.00	5.00	4.04	5.00	.10718-2	T	18660.76		
3306	3309-3306	H32	TUB	40.64	1.270	T	BRC	4.64		3.40	5.00	2.87	5.00	.18723-3	T	106822.6		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
3306	3300-3306	H31	TUB	45.72	1.270	T	CHD	4.64		5.00	5.00	4.04	5.00	.10621-2	T	18830.60		
3305	3310-3305	H32	TUB	40.64	1.270	T	BRC	4.64		3.40	5.00	2.87	5.00	.18701-3	T	106947.4		
3305	3305-3301	H31	TUB	45.72	1.270	T	CHD	4.64		5.00	5.00	4.04	5.00	.10608-2	T	18853.66		
4405	4408-4405	H42	TUB	40.64	1.270	T	BRC	3.49		2.78	5.00	2.87	5.00	.76426-3	R	26169.17		
4405	4400-4405	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	3.49		5.00	5.00	4.04	5.00	.76426-3	R	26169.17		
4404	4409-4404	H42	TUB	40.64	1.270	T	BRC	3.49		2.78	5.00	2.87	5.00	.76353-3	L	26194.16		
4404	4404-4401	H41	TUB	45.72	1.270	T	CHD	3.49		5.00	5.00	4.04	5.00	.76353-3	L	26194.16		
1104	1104-1100	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	7.37	5.44	3.33	4.74	3.55	5.00	.74048-5	TR	2700945.		
1104	1104-103L	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	7.37		5.00	5.00	4.82	5.00	.16455-4	TR	1215441.		
1104	1104-1107	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	7.37	5.44	4.78	5.00	4.03	5.00	.15715-3	T	127263.8		
1104	1103-1104	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	7.37		5.00	5.00	5.00	5.00	.45568-3	T	43897.94		
1103	1101-1103	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	7.37	5.44	3.32	4.74	3.55	5.00	.78258-5	TL	2555922.		
1103	101L-1103	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	7.37		5.00	5.00	4.82	5.00	.17767-4	TL	1125668.		
1103	1103-1108	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	7.37	5.44	4.77	5.00	4.03	5.00	.15487-3	T	129141.5		
1103	101L-1103	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	7.37		5.00	5.00	5.00	5.00	.45082-3	T	44363.25		
2209	2209-2210	H24	TUB	32.38	1.270	T	BRC	3.99		3.31	5.00	2.94	5.00	.47580-4	B	420346.7		
2209	2207-2209	H23	TUB	40.64	1.270	T	CHD	3.99		5.00	5.00	4.12	5.00	.25547-3	B	78287.08		
2210	2209-2210	H24	TUB	32.38	1.270	T	BRC	3.99		3.31	5.00	2.94	5.00	.47285-4	B	422970.9		
2210	2208-2210	H23	TUB	40.64	1.270	T	CHD	3.99		5.00	5.00	4.12	5.00	.25379-3	B	78805.23		
1107	1107-1108	H14	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.82		2.33	5.00	3.22	5.00	.22626-4	B	883946.2		
1107	1104-1107	H13	TUB	45.72	1.270	T	CHD	2.82		5.00	5.00	4.59	5.00	.14059-3	B	142254.9		
1108	1107-1108	H14	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.82		2.33	5.00	3.22	5.00	.19417-4	T	1030032.		
1108	1103-1108	H13	TUB	45.72	1.270	T	CHD	2.82		5.00	5.00	4.59	5.00	.11857-3	B	168675.5		
3301	3301-3303	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	2.32	2.03	2.73	3.21	.50637-6	TL	39497.+3		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
3301	3301-301L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		4.17	3.95	2.31	4.91	.50435-5	L	3965476.		
3301	3302-3301	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	2.90	2.54	2.69	3.84	.16715-4	T	1196508.		
3301	302L-3301	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		4.97	4.82	2.73	5.00	.87759-4	T	227897.1		
3301	3305-3301	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	4.19	4.17	2.64	5.00	.27047-5	B	7394649.		
3301	302L-3301	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		5.00	5.00	3.66	5.00	.12959-4	B	1543360.		
3300	3300-3302	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	2.89	2.53	2.70	3.82	.16073-4	T	1244352.		
3300	3300-304L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		4.97	4.82	2.73	5.00	.83633-4	T	239139.9		
3300	3300-3306	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	4.19	4.17	2.64	5.00	.35682-5	BR	5605094.		
3300	3300-304L	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		5.00	5.00	3.66	5.00	.12101-4	B	1652760.		
3300	3304-3300	H31	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	8.13	10.52	2.28	2.04	2.73	3.22	.60184-6	TR	33231.+3		
3300	303L-3300	H31	TUB	45.72	1.270	TK	CHD	8.13		4.16	3.98	2.32	4.93	.82775-5	R	2416175.		
2208	2207-2208	H24	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.87		2.70	5.00	2.94	5.00	.12299-4	B	1626142.		
2208	2203-2208	H23	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.87		5.00	5.00	4.12	5.00	.66320-4	B	301533.4		
2207	2207-2208	H24	TUB	32.38	1.270	T	BRC	2.87		2.70	5.00	2.94	5.00	.11502-4	T	1738770.		
2207	2204-2207	H23	TUB	40.64	1.270	T	CHD	2.87		5.00	5.00	4.12	5.00	.61828-4	T	323480.3		
1106	1109-1106	H13	TUB	45.72	1.270	T	BRC	7.50		4.44	5.00	2.92	5.00	.61537-5	T	3250054.		
1106	1100-1106	H12	TUB	50.80	1.270	T	CHD	7.50		5.00	5.00	4.17	5.00	.33136-4	T	603565.7		
1105	1110-1105	H13	TUB	45.72	1.270	T	BRC	7.50		4.44	5.00	2.92	5.00	.59664-5	T	3352117.		
1105	1105-1101	H12	TUB	50.80	1.270	T	CHD	7.50		5.00	5.00	4.17	5.00	.32092-4	T	623208.0		
3302	3300-3302	H31	TUB	45.72	1.270	K	BRC	6.88	5.58	3.66	2.81	2.68	4.47	.36175-5	R	5528716.		
3302	304L-3302	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	6.88		4.97	4.92	3.00	5.00	.28948-4	R	690904.4		
3302	3302-3301	H31	TUB	45.72	1.270	K	BRC	6.88	5.58	3.63	2.80	2.68	4.47	.16617-5	L	12036.+3		
3302	3302-302L	H31	TUB	45.72	1.270	K	CHD	6.88		4.96	4.91	2.99	5.00	.19261-4	T	1038341.		
2203	2201-2203	H22	TUB	45.72	1.270	K	BRC	5.89	5.29	3.49	3.99	2.90	5.00	.10096-5	TL	19810.+3		
2203	201L-2203	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	5.89		5.00	5.00	3.49	5.00	.23618-5	TL	8468077.		
2203	2203-2208	H23	TUB	40.64	1.270	K	BRC	5.89	5.29	4.87	5.00	3.15	5.00	.43828-5	B	4563269.		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	ORIGINAL WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SVC LIFE	REQUIRED OD (CM)	REQUIRED WT (CM)
2203	201L-2203	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	5.89		5.00	5.00	4.55	5.00	.19258-4	B	1038514.		
2204	2204-2200	H22	TUB	45.72	1.270	K	BRC	5.89	5.29	3.49	4.00	2.90	5.00	.10389-5	TR	19252.+3		
2204	2204-203L	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	5.89		5.00	5.00	3.49	5.00	.24393-5	TR	8199116.		
2204	2204-2207	H23	TUB	40.64	1.270	K	BRC	5.89	5.29	4.86	5.00	3.15	5.00	.37251-5	T	5368962.		
2204	2203-2204	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	5.89		5.00	5.00	4.55	5.00	.16040-4	T	1246893.		
2200	2200-2202	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.48	3.41	3.38	2.90	5.00	.36959-5	TR	5411432.		
2200	2200-204L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	3.33	5.00	.65029-5	TR	3075556.		
2200	2200-2206	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.48	4.74	4.74	2.92	5.00	.26755-6	B	74753.+3		
2200	203L-2200	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	4.17	5.00	.14165-5	B	14119.+3		
2200	2204-2200	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.48	3.23	2.99	2.89	4.84	.52442-5	TL	3813720.		
2200	203L-2200	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	3.03	5.00	.94185-5	TL	2123473.		
2201	2201-2203	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.46	3.24	2.99	2.89	4.84	.50969-5	TR	3923976.		
2201	2201-201L	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	3.03	5.00	.90641-5	TR	2206516.		
2201	2202-2201	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.46	3.40	3.37	2.90	5.00	.34379-5	TL	5817447.		
2201	202L-2201	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	3.33	5.00	.59314-5	TL	3371878.		
2201	2205-2201	H22	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	9.58	10.46	4.73	4.73	2.92	5.00	.25674-6	T	77900.+3		
2201	202L-2201	H21	TUB	50.80	1.270	TK	CHD	9.58		5.00	5.00	4.17	5.00	.13527-5	T	14785.+3		
2205	2210-2205	H23	TUB	40.64	1.270	T	BRC	6.07		4.18	5.00	2.87	5.00	.16961-5	T	11792.+3		
2205	2205-2201	H22	TUB	45.72	1.270	T	CHD	6.07		5.00	5.00	4.04	5.00	.89254-5	T	2240795.		
1101	1105-1101	H12	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.91	5.00	3.81	5.00	.93865-7	T	21307.+4		
1101	102L-1101	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	5.00	5.00	.34778-6	T	57507.+3		
1101	1101-1103	H13	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.45	4.57	3.52	5.00	.52888-5	BR	3781591.		
1101	1101-101L	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	4.73	5.00	.87045-5	BR	2297665.		
1101	1102-1101	H13	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.74	4.97	3.63	5.00	.46593-5	L	4292494.		
1101	102L-1101	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	5.00	5.00	.67102-5	BL	2980525.		
2206	2209-2206	H23	TUB	40.64	1.270	T	BRC	6.07		4.18	5.00	2.87	5.00	.16490-5	T	12128.+3		

JOINT	MEMBER	GRUP ID	TYPE ID	ORIGINAL OD (CM)	WT (CM)	JNT TYP	MEM TYP	CHORD LEN. (M)	GAP (CM)	* STRESS CONC. FACTORS * AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	FATIGUE RESULTS DAMAGE	LOC	SUC LIFE	REQUIRED OD (CM)	WT (CM)
2206	2200-2206	H22	TUB	45.72	1.270	T	CHD	6.07		5.00	5.00	4.04	5.00	.86895-5	T	2301636.		
1100	1100-1106	H12	TUB	50.80	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.92	5.00	3.81	5.00	.91143-7	B	21944.+4		
1100	103L-1100	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	5.00	5.00	.33791-6	B	59187.+3		
1100	1100-1102	H13	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.76	4.97	3.63	5.00	.43691-5	R	4577607.		
1100	1100-104L	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	5.00	5.00	.65535-5	BR	3051810.		
1100	1104-1100	H13	TUB	45.72	1.270	TK	BRC	11.06	10.44	4.43	4.58	3.52	5.00	.50295-5	BL	3976533.		
1100	103L-1100	H11	TUB	71.12	1.270	TK	CHD	11.06		5.00	5.00	4.73	5.00	.82453-5	BL	2425623.		
1102	1100-1102	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.73	12.98	3.80	4.27	3.42	5.00	.36230-5	R	5520346.		
1102	104L-1102	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	12.73		5.00	5.00	4.49	5.00	.73145-5	R	2734306.		
1102	1102-1101	H13	TUB	45.72	1.270	K	BRC	12.73	12.98	3.79	4.33	3.42	5.00	.39526-5	L	5060001.		
1102	1102-102L	H11	TUB	71.12	1.270	K	CHD	12.73		5.00	5.00	4.49	5.00	.79183-5	L	2525792.		
2202	2200-2202	H22	TUB	45.72	1.270	K	BRC	9.78	5.63	3.77	3.51	2.89	4.98	.61447-6	TL	32548.+3		
2202	204L-2202	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	9.78		5.00	5.00	3.22	5.00	.13185-5	TL	15169.+3		
2202	2202-2201	H22	TUB	45.72	1.270	K	BRC	9.78	5.63	3.78	3.51	2.89	4.98	.62938-6	TR	31777.+3		
2202	2202-202L	H21	TUB	50.80	1.270	K	CHD	9.78		5.00	5.00	3.22	5.00	.12965-5	TR	15426.+3		